



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación :

INGENIERO TÉCNICO INDUSTRIAL MECÁNICO

Título del proyecto:

CUADRO DE BICICLETA EN MATERIAL COMPUESTO

Alberto Solana Rodríguez

Vanesa Estremera Carrera

Pamplona, 17 de febrero de 2014



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación :

INGENIERO TÉCNICO INDUSTRIAL MECÁNICO

Título del proyecto:

CUADRO DE BICICLETA EN MATERIAL COMPUESTO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

Alberto Solana Rodríguez

Vanesa Estremera Carrera

Pamplona, 17 de febrero de 2014

ÍNDICE

MEMORIA

1.1 PRÓLOGO	5
1.2 OBJETO DEL PROYECTO.....	6
1.3 ANTECEDENTES	6
1.4 BICICLETAS DE CARRETERA	8
1.4.1 Partes del cuadro de una bicicleta de carretera	9
1.4.2 Geometría del cuadro y parámetros básicos	9
1.5 ELECCIÓN DE LAS MEDIDAS DEL CUADRO	14
1.6 DISEÑAR DEL CUADRO	17
1.6.1 ¿Qué es Catia?	17
1.6.2 Entorno de Catia	18
1.6.3 Dibujo del cuadro.....	20
1.6.3.1 Caja del pedalier.....	21
1.6.3.2 Tubo de dirección.....	21
1.6.3.3 Tubo horizontal y diagonal	22
1.6.3.4 Tubo del sillín.....	23
1.6.3.5 Vainas.....	24
1.6.3.6 Redondeados en uniones	26
1.6.4 Mallado en Catia	27
1.6.4.1 Adaptación del diseño para el análisis	28
1.6.4.2 ¿Qué es un mallado?	29
1.6.4.3 Proceso de mallado.....	29
1.7 TRABAJAR CON ELEMENTOS FINITOS	31
1.7.1 Preproceso en marc mentat	31

1.8 MATERIALES COMPUESTOS.....	34
1.8.1 Conceptos previos.....	35
1.8.2 Clasificación de los composites.....	36
1.8.3 Propiedades de los constituyentes de los composites reforzados	36
1.8.3.1 Fibras.....	36
1.8.3.2 Maneras de disponer las fibras	39
1.8.3.3 Matrices.....	40
1.9 LAMINAS Y SUS PROPIEDADES.....	42
1.9.1 Propiedades mecánicas de una lámina.....	42
1.9.2 Simetrías en los materiales	43
1.9.3 Estado tensional plano	45
1.9.4 Ejes de coordenadas.....	46
1.10 TIPOS DE LAMINADOS	48
1.10.1 Nomenclatura de los laminados	49
1.10.2 Teoría de los laminados	49
1.11 CRITERIOS DE FALLO EN LÁMINADOS	54
1.11.1 Criterio de máxima tensión principal.....	54
1.11.2 Criterio de Tsai-Wu	55
1.12 FABRICACIÓN DE COMPOSITES.....	56
1.12.1 Wet lay-up.....	56
1.12.2 Bobinado.....	57
1.12.3 Prepregs	57
1.12.4 Pultrusión	58
1.12.5 Método elegido para la fabricación del cuadro.....	58
1.12.6 Proceso de fabricación de los cuadros	58
1.13 SELECCIÓN DE MATERIALES.....	59
1.14 CONCLUSIÓN FINAL DEL PROYECTO	61
1.15 RESUMEN DEL PRESUPUESTO	62

1.16 BIBLIOGRAFÍA PROYECTO FIN DE CARRERA	63
1.15.1 Libros y apuntes	63
1.15.2 Páginas web	63

1.1 PRÓLOGO

Después de tres años estudiando esta carrera, ha llegado la hora de realizar el famoso 'Proyecto Final de Carrera'. Se trata una oportunidad para investigar sobre temas que hayan levantado la curiosidad en el periodo de formación y conseguir darles forma para que tengan sentido en el mundo real. Naves industriales, climatizaciones, canalizaciones de agua, creación de piezas de máquinas o automóviles... son un montón de ideas para poder realizar un proyecto con ellas pero ninguna me convencía. Durante estos años, he conocido compañeros y profesores con múltiples aficiones fuera del ámbito laboral y he tenido oportunidad de conocer deportes más a fondo.

Uno de ellos ha sido el ciclismo, el esfuerzo que es necesario para subir cuestas o conseguir ir a una velocidad alta en llano, me hizo reflexionar sobre el esfuerzo tan titánico que realizan los ciclistas durante las carreras. Y entonces me di cuenta que sus bicis eran diferentes y me picó la curiosidad. En ese momento, empecé a indagar y a entender las diferencias.

Fue pasando el tiempo y se acercaba el momento de elegir cuál iba a ser el tema de mi PFC. Ninguno me convencía al 100%, solo sabía que quería utilizar este momento para aprender sobre cosas nuevas ya que al fin y al cabo, no habían dejado de repetirme todos los profesores que un ingeniero no es alguien que sabe de memoria todo lo que le han enseñado desde el primer día en la Escuela, sino una persona capaz de manejar unos conocimientos, aprender nuevos si es necesario, y utilizarlos para resolver un problema concreto. Ese día al salir del Aulario y ver el parking de bicicletas volví a recordar el día aquel y ya supe cuál iba a ser el proyecto que elegiría. Lo estuve meditando unos días y finalmente se lo propuse a Vanesa para ser la tutora.

Desarrollando este proyecto he podido buscar conocimientos por mi cuenta y ver realmente aquello que decían mis profesores sobre el ingeniero en esencia y su capacidad para buscar soluciones a problemas de la vida cotidiana ya sean en empresas que necesitan una serie de instalaciones, o en el mundo de la competición buscando como facilitar el trabajo a los atletas.

1.2 OBJETO DEL PROYECTO

Este proyecto trata sobre el diseño y el cálculo de un cuadro de bicicleta de carretera realizado en materiales compuestos. Esta en particular va a ser fibra de carbono ya que es la más utilizada en el mundo de la competición actualmente, y cada vez más en el resto de bicicletas.

El principal objetivo es realizar una inmersión en el campo de los materiales compuestos, cuyas propiedades son bastante diferentes si se comparan con otros que han sido utilizados en diversas asignaturas de la carrera. Una vez entendidas estas ventajas y desventajas sobre los materiales isótropos como por ejemplo el acero o el aluminio, el siguiente paso es la aplicación de la fibra de carbono en las piezas que componen la bicicleta. Una vez se haya calculado el espesor de los tubos necesario y demás parámetros para que funcione correctamente, es importante ver los procesos de fabricación con estos materiales y pensar cuál sería el más adecuado. De esta forma se habrá cumplido gran parte de lo que se pretende con este proyecto: aprender a usar un material compuesto y conocer cómo se fabrican.



Otro objetivo muy importante es conseguir familiarizarse con los programas de diseño y de cálculo con elementos finitos. Hoy en día se utilizan en todos los procesos de fabricación sea cual sea la pieza o conjunto. Es por eso que se hace necesario para un ingeniero el saber utilizarlos. Para diseñar el cuadro se utilizará Catia V5 y para el posterior mallado y análisis de tensiones Marc Mentat. Son dos programas concretos pero el funcionamiento general es común para casi todos los programas de este tipo.

1.3 ANTECEDENTES

Hoy en día la bicicleta es uno de los medios de transporte más usados en el mundo. Es un vehículo cómodo, ligero, ágil y fácil de aparcar que permite desplazamientos por cualquier tipo de superficie: ciudades, campo, carreteras...etc. La bici ha estado siempre en continua evolución, variando sus diseños aunque manteniendo constantes ciertos criterios. Es dentro del mundo de la competición donde más se han aplicado esos cambios para después ser introducidos en las bicicletas de calle. Materiales de diseño, geometrías, suspensiones, ruedas, cambios electrónicos...son algunos de los ejemplos que han ido variando con los años convirtiéndose en sistemas muy sofisticados.

Se pueden clasificar de diferentes formas aunque la más común es según el uso que se le vaya a dar. Todas tienen cosas en común pero las prestaciones que se esperen de ella hará que varíen ciertas piezas o geometrías. Por ejemplo, una bici para andar por ciudad deberá tener amortiguación, pero no hará falta que sea tan radical como la que lleva una Mountain Bike, sus ruedas no necesitarán tacos ya que en las ciudades no hay barro, y puede que la geometría de su cuadro tenga diferente forma para poder maniobrar mejor por las calles de una ciudad. Sin embargo, a la bicicleta de montaña no le valdrán unos simples frenos de zapata, ni los desarrollos conservadores de la otra bici.

A continuación, una clasificación más amplia:

Tipo de Bicicleta	Usos	Materiales del cuadro	Propulsión	Fotografía
Mountain Bike	Todoterreno	Aluminio y/o Fibra de Carbono	Humana	
Ruta	Carretera	Fibra de carbono	Humana	
Paseo	Ciudad y caminos	Aluminio	Humana	
Plegable	Ciudad	Acero	Humana	
Trial	Bosque y trials	Aluminio	Humana	
BMX	Skateparks	Aluminio	Humana	
Eléctrica	Ciudad y carretera	Aluminio	Humana combinada con un motor eléctrico	

En la tabla anterior están expuestos unos cuantos tipos de bicicletas y se puede ver a simple vista que son distintas unas de otras aunque manteniendo ciertas similitudes. Cada una busca cumplir una función en un entorno concreto y por ello es necesario hacer cambios en sus diseños. No solamente su forma es diferente sino que los materiales de los que están hechas en algunos casos cambian. Se emplea el aluminio en la mayoría de los casos ya que es un material no muy caro en comparación a la fibra de carbono o el titanio y cumple de sobra con los requisitos del día a día sin significar un gran gasto para la persona que vaya a utilizarla.

Sin embargo, dentro del mundo de la competición es necesario afinar todo hasta el límite: optimizar el peso, conseguir la bici más aerodinámica, los desarrollos que más se ajusten al ciclista...etc. Con estas premisas se necesitan los mejores materiales y los estudios más precisos por lo que el precio de las bicicletas se incrementa de una forma significativa y durante unos años, hasta que los medios tecnológicos permiten llevarlas a la calle por unos precios razonables, sólo las utilizan los equipos profesionales.

1.4 BICICLETAS DE CARRETERA

La bicicleta de carretera, o también conocida como bici de ruta, está concebida para ser usada en el asfalto. En caso de portar unas ruedas especiales para barro, nieve, y superficies resbaladizas podría usarse también para Ciclocross. Generalmente, en las carreteras existen zonas llanas, zonas de subida con todo tipo de pendientes, y zonas de bajada que al igual que los ascensos, pueden tener diferente pendiente y dificultad en las curvas. Este entorno obliga a la bicicleta, y en especial al cuadro, a tener unas características especiales: agilidad, ligereza, resistencia, aerodinámica...

La evolución de los materiales a lo largo del tiempo ha supuesto una revolución permitiendo dar cualquier forma al cuadro y obtener unas propiedades excelentes. Al principio, estaban hechos de acero, cuya densidad media es de 7850 Kg/m^3 . Sus formas eran algo rudimentarias y además su coste de fabricación era alto.



Más adelante, el aluminio comenzó a ganar protagonismo gracias a su menor precio de fabricación, su mayor ligereza frente al acero (2698 Kg/m^3) y su buena resistencia.

Además, este material era más fácil de trabajar que el acero. Actualmente, la gran mayoría de cuadros que no están destinados a la competición siguen fabricándose con este material.

Unos años más tarde, la llegada de la fibra de carbono a la competición supuso una gran revolución en todos los aspectos. Se empezó a fabricar la horquilla delantera con este material y progresivamente se fueron reemplazando otras piezas hasta que finalmente se construyó entera. Las claves del éxito de la fibra de carbono residen en sus propiedades. Estas se adaptan perfectamente a lo que una bicicleta de carreras necesita: Ligereza (1750 Kg/m^3), gran resistencia y la posibilidad



de moldearla con cualquier forma sin importar lo compleja que sea. El único inconveniente de este material es que en caso de un impacto fuerte se parte el cuadro y es laborioso arreglarlo, mientras que si es de aluminio gracias a su ductilidad puede que sea posible rectificarlo si está algo doblado.

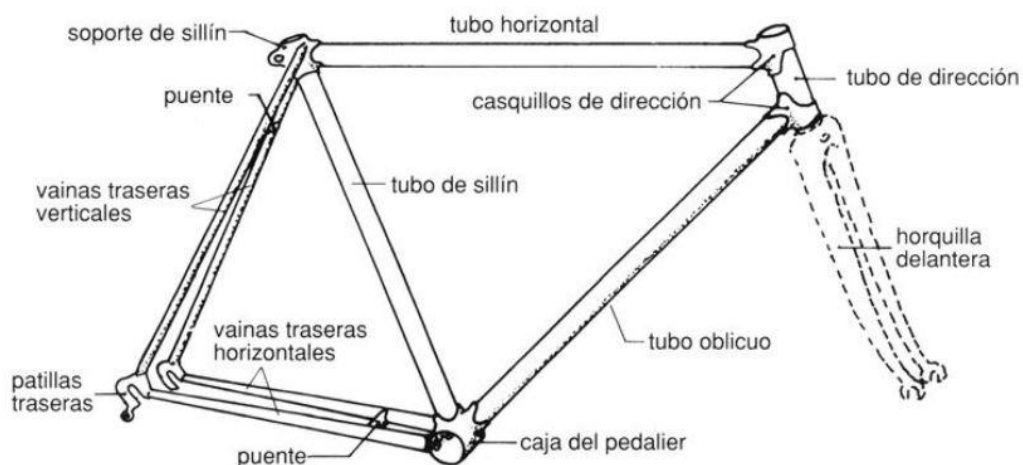
Se aprecia a simple vista la diferencia entre la bici antigua y la nueva. No solamente por el material sino por su geometría mucho más refinada que gracias a la fibra de carbono es posible darle.

También es usado, aunque no con mucha frecuencia, el titanio. Es un material que cumple las características necesarias y además es muy ligero. En contrapartida, tiene un precio bastante alto.

1.4.1 Partes del cuadro de una bicicleta de carretera

El cuadro es el alma de la bici. Es el responsable de aguantar y transmitir de forma correcta las fuerzas que continuamente le llegan desde el suelo al ciclista. A la de hora de diseñar un cuadro, se necesita saber cuáles son sus partes y cómo están interactuando entre ellas. No es lo mismo un cuadro fabricado en un metal que uno en material compuesto. Las uniones de las piezas pueden ser soldaduras en caso de metales o con resinas si se trata de un material compuesto. Por lo tanto, según el material que se vaya a usar, el cuadro tendrá que unir sus piezas de formas diferentes para que las uniones aguanten.

El cuadro está compuesto por cuatro tubos principales: horizontal, oblicuo, del sillín y de la dirección. El punto donde se juntan el oblicuo y el del sillín es conocido como caja del pedalier. De la caja del pedalier salen las vainas horizontales. Estas están unidas al soporte del sillín por medio de las vainas verticales. A su vez el tubo de dirección se diseñará de forma que tanto el horizontal como el oblicuo encajen en él ya que al ser material compuesto no van a poderse soldar unos con otros.



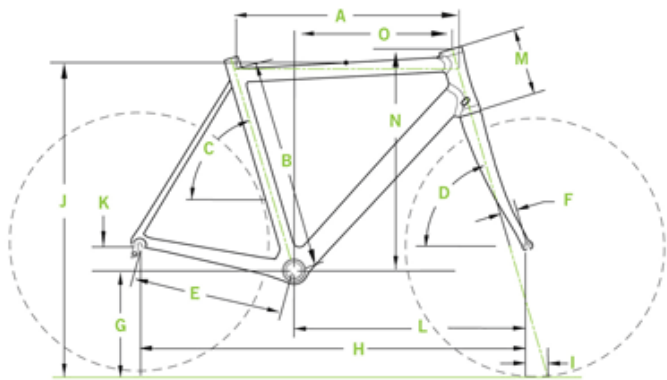
1.4.2 Geometría del cuadro y parámetros básicos

Es necesario conocer la dinámica de la bicicleta para obtener un diseño eficaz y eficiente. Un diseño eficaz significará que la bici responde bien ante la situación para la que ha sido ideada. Eficiente porque se habrá utilizado la cantidad mínima de material, afectando al precio, al peso, y por consiguiente a la dinámica. Si los parámetros más importantes están bien ajustados, la bicicleta tendrá un comportamiento bueno y será

competitiva. De lo contrario, esta se volverá difícil de manejar e insegura ya que sus reacciones frente a las acciones exteriores o del ciclista no serán del todo esperadas.

Estos parámetros se han de ajustar sobretodo en función del estilo de conducción de cada ciclista. Es muy importante que la talla de la bici sea la correcta ya que de lo contrario podría correr situaciones de riesgo ante lesiones innecesarias. Así pues, se deberá diseñar el cuadro con unos datos de partida pero será necesario que haya unos márgenes para que cada corredor haga sus propios reglajes.

Para representar gráficamente estos parámetros lo más común es un plano en 2D en el cual están acotados y gracias a una tabla con las tallas existentes se pueden obtener los valores. A continuación un ejemplo de cómo la marca Cannondale referencia sus bicicletas y con el cual se explicarán los parámetros más importantes y su influencia.



★ Indicates same as previous
Specifications subject to change without notice.

SUPERSIX EVO

SPECIFICATIONS	48	50	52	54	56	58	60	63
A HORIZONTAL TOP TUBE LENGTH (CM)	51.0	52.0	53.5	54.5	56.0	57.5	59.0	60.0
B MEASURED SIZE (CM)*	46.0	48.0	50.0	52.0	54.0	56.0	58.0	61.0
C SEAT TUBE ANGLE	74.5 °	74.5 °	74.0 °	73.5 °	73.5 °	73.0 °	72.5 °	72.0 °
D HEAD TUBE ANGLE	71.5 °	72.0 °	72.5 °	73.0 °	★	73.5	★	★
E CHAINSTAY LENGTH (CM)	40.5	★	★	★	★	★	40.8	★
F FORK RAKE (CM)	4.5	★	★	★	★	★	★	★
G BOTTOM BRACKET HEIGHT (CM)	26.5	★	★	26.8	★	27.0	★	★
H WHEELBASE (CM)	96.2	96.7	97.3	97.5	99.0	99.6	100.8	101.1
I TRAIL (CM)	6.5	6.2	5.9	5.6	5.6	5.3	★	★
J STANDOVER AT TOP TUBE MIDPOINT (CM)	74.2	75.5	76.7	78.8	80.4	82.5	84.3	86.9
K BOTTOM BRACKET DROP (CM)	7.2	★	★	6.9	★	6.7	★	★
L FRONT CENTER DISTANCE (CM)	56.3	56.9	57.5	57.6	59.1	59.7	60.6	60.9
M HEAD TUBE LENGTH (CM)	11.0	11.5	12.0	14.0	15.5	17.5	19.5	22.0
N STACK (CM)	51.3	51.9	52.6	54.4	55.8	57.7	59.6	62.0
O REACH (CM)	36.8	37.6	38.4	38.4	39.5	39.9	40.2	39.9

* THE MEASURED SIZE IS FROM THE CENTER OF THE BOTTOM BRACKET TO THE TOP OF THE TOP TUBE, MEASURED ALONG THE SEAT TUBE AXIS.

A	Longitud del tubo horizontal
B	Longitud del tubo del sillín
C	Ángulo del tubo del sillín
D	Ángulo del tubo de dirección
E	Longitud de las vainas horizontales
F	Avance de la horquilla
G	Altura de la caja del pedalier
H	Batalla
I	Avance de la dirección
J	Altura del punto medio del tubo horizontal
K	Diferencia de altura entre la caja del pedalier y el buje de la rueda trasera
L	Distancia de la caja del pedalier al eje delantero
M	Longitud del tubo de dirección
N	Diferencia de altura entre la caja del pedalier y el final del tubo de dirección
O	Distancia entre la caja del pedalier y el final del tubo de dirección

C-Ángulo del tubo del sillín

Representa el ángulo que forma el tubo del sillín y el eje horizontal, medido en el tercer cuadrante. Oscila entre 70 y 75 grados. Cuanto menor sea este ángulo, más echado hacia atrás estará el centro de gravedad del conjunto y más estable será en llano. Si es al revés, la posición favorecerá la escalada. Es un parámetro fijo de fábrica que generalmente los ciclistas ajustan gracias a los sillines montados sobre una guía.

D-Ángulo del tubo de dirección

Es el formado entre la barra de dirección y el eje horizontal. Se mide en el tercer cuadrante y suele oscilar entre los 71 y los 74 grados en la mayoría de bicicletas de carretera. Cuanto mayor sea el ángulo, la bici tendrá una mayor estabilidad en línea recta. Por el contrario, para valores menores a 71 grados, la bici se tornará muy ágil en curva y menos estable en línea recta. Como norma general si el ángulo es pequeño la distancia entre ejes será mayor para compensar el comportamiento.

E-Longitud de las vainas horizontales

Esta medida afecta a varios aspectos en el comportamiento de la bicicleta. En primer lugar a la distancia entre ejes. Al acortarlas se gana potencia de pedaleo y tracción en la rueda trasera. Actualmente la tendencia está siendo de acortarlas en las bicis de carretera mientras que en las mountain bike se mantienen más alargadas.

F-Avance de la horquilla

Es la distancia existente entre el eje del tubo de dirección y el centro del buje de la rueda delantera. Sirve para que la horquilla delantera absorba parte de las vibraciones. Las medidas más comunes van de 4 a 5 cm.



G- Altura de la caja del pedalier

Es la distancia del centro del pedalier al suelo. Limita la distancia máxima de las bielas. Generalmente se sitúa a una altura para que en alguna curva cerrada al estar la bici algo inclinada se pueda seguir pedaleando sin rozar el suelo. Si la altura es baja el centro de gravedad también lo es y por lo tanto la bicicleta se vuelve más ágil. Si no el comportamiento será más estable y será más fácil el manejo.

H- Batalla

Es la distancia entre los ejes de las ruedas delantera y trasera. Esta magnitud influye mucho en el comportamiento dinámico de la bicicleta. Cuanto mayor sea, la bici se mostrará más estable en línea recta pero más difícil de entrar a las curvas y de trazarlas con agilidad será. Generalmente en las bicicletas de carretera no es muy grande en comparación a las mountain bike ya que a la hora de escalar montañas o rampas de gran pendiente el ciclista necesita agilidad al balancear la bici con el pedaleo alegre.

I-Avance de la dirección

Es la distancia que hay entre la prolongación del eje del tubo de dirección y el perpendicular al suelo trazado desde el buje de la rueda. Esta magnitud está relacionada directamente con el momento autoalineante que ayuda a enderezar las ruedas cuando se giran, y puede ser cero, positiva o negativa. En caso de ser positivo, este momento ayudará a contrarrestar el giro de la rueda y cuanto mayor sea, más estable será la bicicleta.



Comparación de los parámetros en el mercado:

En la tabla que sigue a continuación se pretende buscar las similitudes y diferencias existentes entre bicicletas de misma gama pero diferente marca en el mercado. Se trata de bicicletas que llevan los profesionales y que están fabricadas íntegramente en fibra de carbono. La talla elegida para la comparación es igual, o muy parecida, ya que sino esta comparación carecería de sentido. No todos los fabricantes facilitan todos los datos en sus páginas web así que se han recopilado los más completos.

En lo referente al ángulo de dirección, todas las marcas eligen un valor acotado entre 72 y 74 grados. Esto significa que todas buscan una estabilidad buena en recta sin sacrificar demasiado la agilidad en el paso por curva. Es consecuente con la idea para la que están concebidas porque en las etapas hay grandes tramos de rectas y en muchas ocasiones han de luchar contra el viento, luego es necesaria una buena estabilidad.

El ángulo del sillín varía entre 72 y 73,5 grados . Esto hace que en estas bicicletas la postura sea deportiva al ir más encogido el ciclista y a su vez facilita echar el cuerpo hacia adelante cuando haya que escalar puertos.

En cuanto a las vainas, y los avances de la horquilla y de la dirección son todos muy parecidos. La conclusión que se extrae es que después de todas las horas de simulaciones y cálculos todos los fabricantes apuntan hacia el mismo sitio con ligeras variaciones que utilizarán para vender sus productos.

Modelo	Ángulo dirección en grados	Ángulo del sillín en grados	Longitud vainas traseras (mm)	Avance de la horquilla (mm)	Avance de la dirección (mm)
Pinarello Dogma 65.1	73,4	72,4	408	43	-
BMC teammachine SLR01	72,5	73,5	402	-	-
Colnago C59	-	72,75	409	-	-
Merida REACTO 907-E	73	73	405	-	-
Cannondale SuperSix EVO	73,5	72	408	45	53
Trek Domane 6,9	72,1	72,5	425	48	59
Giant TCR ADVANCED	72,5	73	430	-	-
Conor WRC Carbon	73	73	408	0	-
Specialized Tarmac sl4	74	72,5	410	53	43

1.5 ELECCIÓN DE LAS MEDIDAS DEL CUADRO

Además de los parámetros ya citados anteriormente, es importante un correcto dimensionamiento de los tubos que forman el cuadro. Deben aguantar sin problemas las acciones exteriores y también han de permitir que la postura del ciclista que maneja la bicicleta sea cómoda y segura para prevenir lesiones causadas por malas posturas y movimientos.

Generalmente, las grandes marcas crean los modelos de bicicletas en diferentes tallas. Así cubren un amplio segmento de la población ya que aunque no estén hechas a medida, gracias al ajuste del sillín y del manillar se puede encontrar la postura adecuada. Esto significa que existen unas medidas de referencia para saber el tamaño del cuadro.

La ergonomía en la bicicleta es un campo cada vez más amplio y muy relacionado con la biomecánica. Este tema da para realizar un proyecto aparte debido a su gran amplitud aunque como no es el objetivo de éste, simplemente se van a intentar tomar unos pocos conceptos simples para no desviarse del tema principal, y poder justificar algunas de las medidas de los tubos del diseño.

En la página web de la marca Canyon, existe un programa que introduciendo algunas medidas del cuerpo, nos da una orientación de que talla escoger, y por ende, cuáles serán las medidas adecuadas. Los parámetros básicos que este simulador pide son:

- Altura
- Peso
- Sexo
- Altura hasta la entrepierna
- Altura del torso
- Anchura de hombros
- Longitud de los brazos



Esas medidas están relacionadas con los parámetros de diseño y para obtener una buena postura se requiere lo siguiente:

- La pierna no ha de estirarse ni doblarse por completo nunca. Esto significa un ángulo que oscile entre 80 y 150 grados. La imagen lo muestra de forma muy clara. Se suele utilizar una fórmula que indica que la medida del tubo más el sillín ha de ser igual a 0,88 veces la altura de la entrepierna.

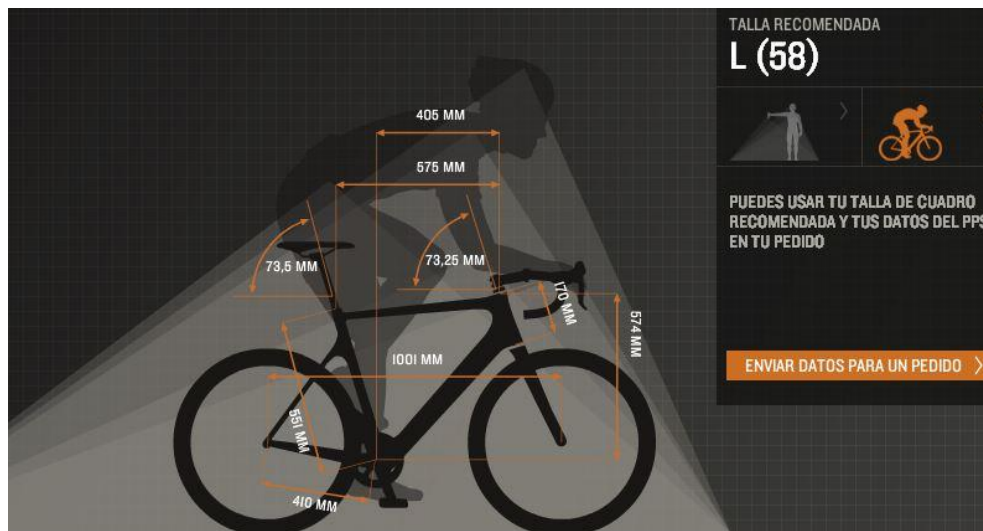
- La espalda ha de intentar llevarse en paralelo al tubo horizontal pero con los brazos estirados. En esto tiene mucho que ver un nuevo parámetro llamado potencia del manillar. Indica la inclinación de éste con respecto a la horizontal y según varíe influye en la postura de los brazos y de la espalda.

Con este par de conceptos se puede resumir de forma muy general la manera de conseguir la posición adecuada. Ya se ha dicho que es un campo muy extenso el de la ergonomía y la biomecánica y que ahora está experimentando grandes avances. Cada vez se tienen más en cuenta este tipo de factores a la hora de competir ya que por poco que aporten, todo suma y constantemente los deportes contra el cronómetro están buscando la forma de mejorar décima a décima.

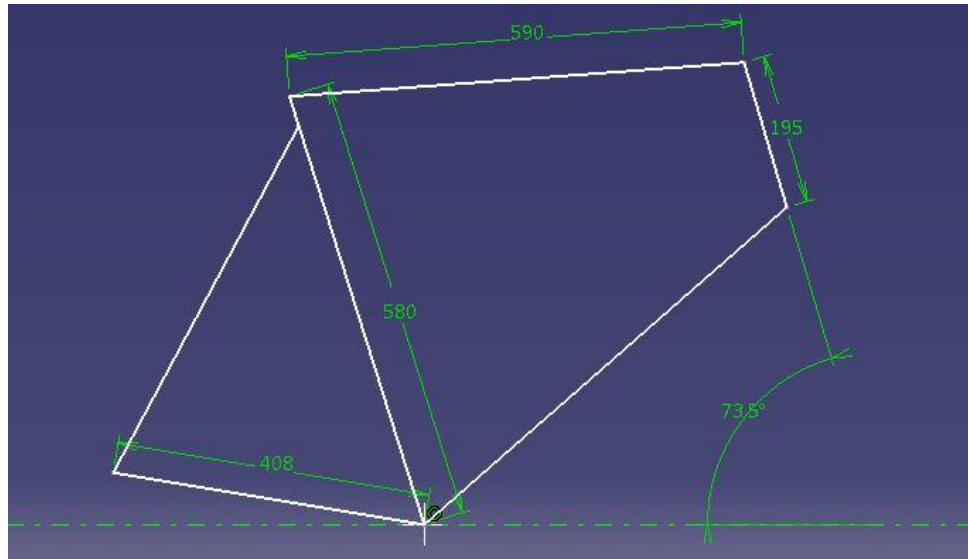
Una vez entendido esto, la elección de las medidas para el cuadro van a ser las que se adapten a una persona que tenga las siguientes medidas:

- Altura: 193 cm
- Peso: 90kg
- Sexo: Varón
- Altura hasta la entrepierna: 88 cm
- Altura del torso: 73 cm
- Anchura de hombros: 50 cm
- Longitud de los brazos: 63 cm

Tras introducir las medidas en el simulador de Canyon, recomienda escoger la talla 58.



Aunque la aproximación es buena, el sillín ha de colocarse bastante alto. Por ello se decide escoger una talla más y así poder jugar con los centímetros adicionales del sillín y la potencia del manillar. Comparando las medidas de las tallas entre los distintos fabricantes se llega a la conclusión de que son todas bastante parecidas. Finalmente se utilizan las medidas de la talla 60 de Cannondale para realizar el diseño.



Como se puede ver en la imagen () las medidas y ángulos corresponden con la talla 60.

- Tubo del sillín: 580 mm
- Tubo de dirección: 195 mm
- Tubo horizontal : 590 mm
- Vainas inferiores: 408 mm

Muchos de los diámetros de los tubos no son facilitados por lo que se inventarán y se irán detallando sus medidas más adelante en el capítulo relativo a los planos.

1.6 DISEÑAR DEL CUADRO

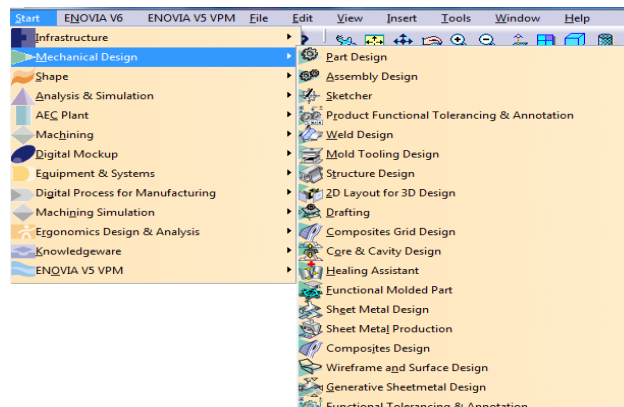
1.6.1 ¿Qué es Catia?

Catia es un software de diseño de CAD en 3D que se utiliza en todo el mundo para el diseño de cualquier pieza, conjunto o problema que surja en la ingeniería. Catia funciona dividido en módulos que se adaptan a cada una de las necesidades para las que ha sido concebido. No solo sirve para dibujar sino que también ofrece las opciones de realizar cálculos y simulaciones de todo tipo.

Catia posee variedades diferentes para realizar el diseño y en este proyecto se van a utilizar varios de ellos:

- **Mechanical Design:** Dentro de este módulo se encuentran englobadas todas las herramientas necesarias para dibujar una pieza o conjunto. A partir del submódulo 'Part Design' es posible dibujar en 3D y gracias al 'Assembly Manager' ensamblar conjuntos y ver cómo trabajan. También se encuentran otras opciones para diseñar composites, soldaduras y cálculo de estructuras. Otro submódulo muy interesante y que también se va a tener uso en la realización del cuadro es 'Wireframe and Surface Design' con el que se va a facilitar el dibujo de solamente superficies.
- **Analysis & Simulation:** Este módulo resulta de gran utilidad ya que permite tanto mallar una pieza, superficie o conjunto, como simular por elementos finitos cuál va a ser la situación final. Se divide en dos submódulos: 'Advanced Meshing Tools' y 'Generative Structural Analysis'. Con el primero se ofrece la posibilidad de mallar una pieza como sea más conveniente y el segundo permite realizar cálculos aproximados por elementos finitos.
- **Resto de módulos:** Catia ofrece módulos para crear Layouts en planta, mecanizado de piezas, ergonomía de las máquinas, circuitos eléctricos, etc..

Se trata pues de un completísimo programa que facilita y ayuda a mejorar el trabajo de ingenieros, arquitectos y diseñadores.

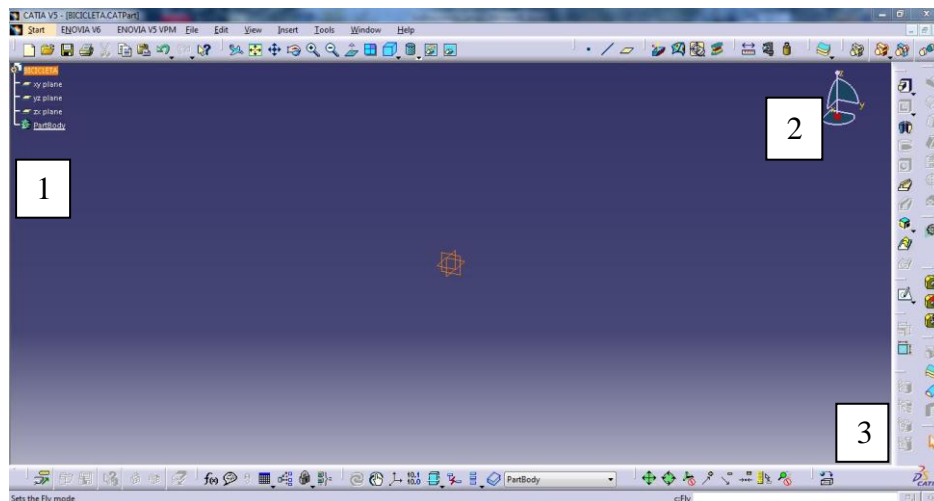


1.6.2 Entorno de Catia

Como bien se ha dicho antes, para elaborar el diseño del cuadro, se va a utilizar el módulo 'Mechanical Design' y para crear un mallado exportable a Marc Mentat, se usará el módulo 'Analysis & Simulation'.

En primer lugar, la construcción del cuadro se va a realizar con el submódulo 'Part Design' que permite el modelado en 3D de cualquier tipo de pieza. Por ser un cuadro en una sola pieza, no va a ser necesario la utilización de 'Assembly' pero sí que se va a utilizar en algún momento 'Wireframe and Surface Design' ya que por estar realizado en material compuesto, y por ende, dividido en varias láminas, va a ser conveniente mallar la superficie del cuadro y luego indicar en el programa de análisis por elementos finitos cuántas y de qué espesor van a ser las capas.





Una vez abierto el programa y el Part, este es el entorno que aparece:



En él pueden observarse varias cosas importantes:

- Árbol de operaciones (1): En ese menú van apareciendo las operaciones que se han realizado. Da la posibilidad de ocultarlas, modificarlas y ordenarlas.
- Ejes de coordenadas (2): Facilitan mover la pieza para visualizarla mejor así como la selección de los ejes o planos de referencia a la hora de hacer operaciones.
- Barras de herramientas (3): En este apartado están todos los botones para realizar operaciones sobre el diseño. Es personalizable y según la situación se activan unos u otros botones. No siempre aparecen los mismos botones ya que si se está realizando una operación u otra, aparecen los que sean compatibles.

Dentro de las barras de herramientas, las más utilizadas van a ser las siguientes operaciones:

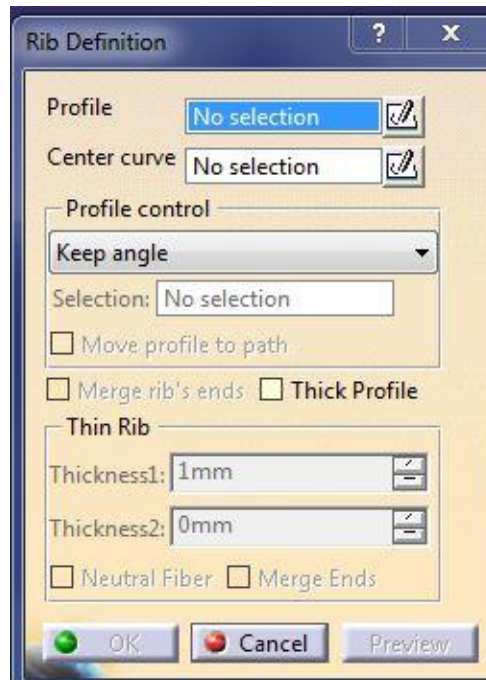
- Creación de puntos, líneas y planos: Catia permite la creación de estos y ofrece un amplio abanico de posibilidades a la hora de ello. Lo más común es crear puntos conociendo sus coordenadas, líneas con dos puntos y planos perpendiculares a una línea por un punto. 
- Creación de un Sketch: Un Sketch es un dibujo en dos dimensiones sobre un plano existente. En él se pueden dibujar cualquier figura geométrica y son la base de las demás operaciones que se realizan en 3D. Para crear uno sólo hay que pulsar el botón  y seleccionar el plano donde se quiere dibujar. Al entrar dentro del Sketch se activan todas las herramientas de dibujo en 2D y desaparecen las de operaciones que impliquen aumento o disminución de un volumen.
- Creación de volúmenes: A la hora de crear un volumen se puede hacer con dos operaciones básicas que tienen como base común un Sketch. Estas operaciones son Rib  y Pad  y aunque tienen cosas en común su resultado es diferente.

-Pad: Es la operación más sencilla de las dos y su función es extruir un Sketch existente en la dirección perpendicular al plano que lo contiene.

Dentro de las posibilidades ofrecidas, en el apartado Type, da a elegir cómo extruir el Sketch: una dimensión introducida por el usuario, hasta un plano o hasta que el siguiente trozo de material. También permite extruir el Sketch en los dos sentidos en una sola vez.



-Rib: Es el paso siguiente para complementar la herramienta Pad. Al pinchar ese botón aparece un cuadro de diálogo en el que hay que introducir qué Sketch va a ser la sección (profile) y cuál va a ser la curva guía (center curve). Con esta herramienta nace la posibilidad de crear tubos curvados del tipo que sea.



- Vistas de la pieza: Esta mini barra de herramientas tiene un gran utilidad. Dentro de ella se encuentran las opciones para mover la pieza, hacer zoom y marcar aristas vistas y no vistas.



Además de las herramientas y operaciones ya explicadas, Catia ofrece multitud más: vaciados, redondeos, achaflanados..etc. Alguna de estas será utilizada en el proceso de diseño pero será con función estética. En resumen, puede decirse que el entorno de Catia es muy favorable para el diseño y además facilita y simplifica los pasos enormemente ahorrando una gran cantidad de tiempo y permitiendo visionar ciertas modificaciones durante el proceso.

1.6.3 Dibujo del cuadro

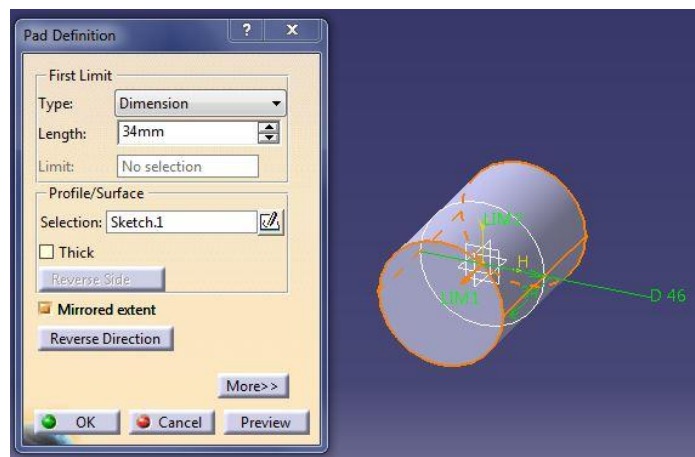
Para dibujar el cuadro de la forma más simple y sin que se presenten problemas con el programa hay que definir un orden. Tras sopesar las opciones que ofrece Catia el orden elegido es el siguiente:

1. Caja del pedalier: Es un punto de unión de todos los tubos y por ello es más simple comenzar a dibujarlos desde ahí.
2. Tubo de dirección
3. Tubo transversal
4. Tubo horizontal
5. Tubo del sillín
6. Vainas inferiores
7. Vainas superiores.
8. Redondeos en las uniones de los tubos

1.6.3.1 Caja del pedalier

Esta parte del cuadro se encarga de alojar el eje del pedalier al cual están conectados los pedales. Por lo tanto, se trata de un cilindro hueco que sirve de nodo para el resto de los tubos del cuadro.

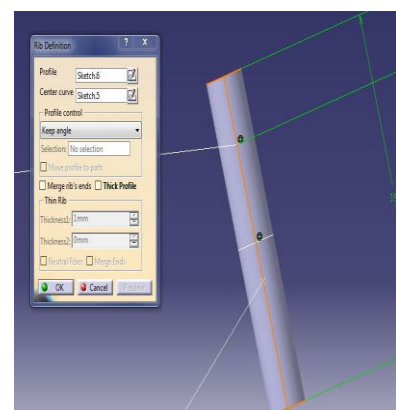
Para dibujarlo, se selecciona el plano YZ y se realiza un Sketch en forma de círculo, de diámetro 46mm. Posteriormente con la herramienta Pad se extruye 34 mm hacia cada sentido.



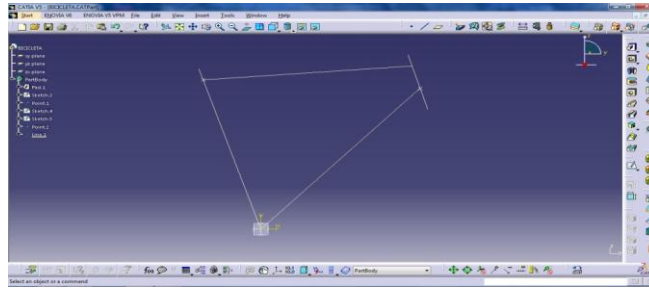
Como nota general, hay que recalcar que tanto en este tubo como en el resto no se van a realizar operaciones de vaciado ya que al transformar el archivo a formato .igs con eliminar las tapas de algunos tubos será suficiente.

1.6.3.2 Tubo de dirección

Para poder dibujar este tubo, hay que realizar un paso previo, trazando los ejes de los demás tubos que forman el cuadrilátero principal. De esta forma se fija la geometría y los puntos de los que parten las barras. Las dimensiones utilizadas son las que se han explicado en el apartado 'Geometría y dimensión del cuadro'. Lo siguiente para dibujar el tubo de la dirección es crear un



plano perpendicular por el punto medio a esa línea y trazar el Sketch para extruirlo con Rib.



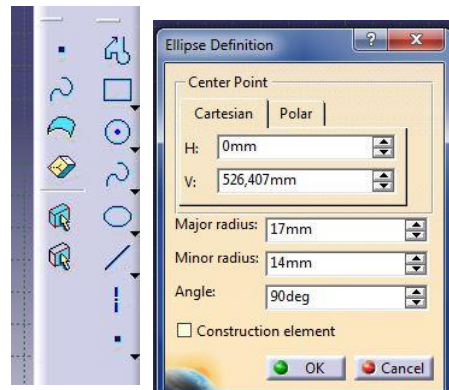
Este tubo es circular y tiene un diámetro de 31,6 mm. Si se toma como referencia el punto superior del eje del tubo, que mide 195mm y tiene un ángulo de 73,5 grados, el tubo horizontal conecta a 40 mm y el diagonal 120mm.

1.6.3.3 Tubo horizontal y diagonal

Como el proceso y la sección de ambos tubos es de la misma forma, quedan englobados en tan solo un apartado. Lo primero que se hace es trazar los planos perpendiculares por los puntos medios de cada línea. La sección de estos tubos es elíptica pero Catia ofrece una herramienta para poder dibujarlas. En ella no hay más que seleccionar cuáles van a ser las dimensiones de los ejes mayor y menor y la orientación del primero con la horizontal de los ejes de referencia locales del plano en el que está situado el Sketch.

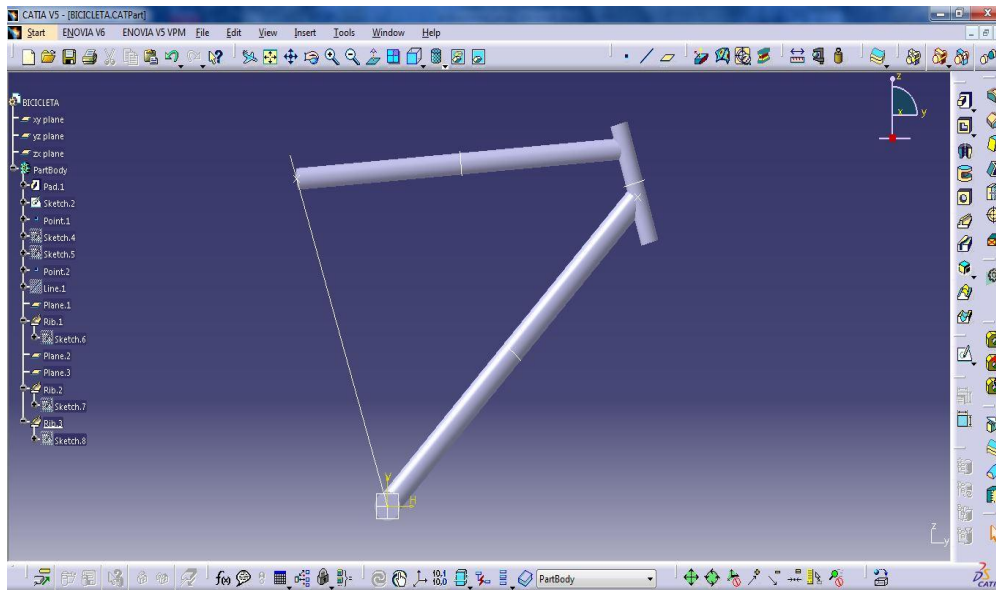
Las herramientas para dibujar elipses aparecen al abrir un Sketch junto al del resto de geometrías.

Las dimensiones del tubo horizontal son 17 mm y 14 mm con el radio mayor orientado en la horizontal del plano. El radio mayor del tubo diagonal mide 20 mm, el menor 15 mm y la elipse está orientada de la misma forma que en el tubo horizontal.



Para extruir estos tubos se pueden utilizar tanto la herramienta Pad como Rib. Al seleccionar Rib extruye por toda la línea y crea la intersección con los tubos ya dibujados. Si se usa la opción Pad, hace falta indicar 'Up to Next' en ambos sentidos y el resultado será el mismo.

Una vez definidos los perfiles elípticos el cuadro presenta el siguiente aspecto



1.6.3.4 Tubo del sillín

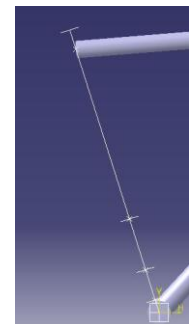
Este tubo lo he dejado para el final porque por el hecho de tener un perfil variable, se puede adaptar a los demás para que no haya problemas de geometría. Este proceso se va a realizar en 3 pasos:

1. Creación de planos perpendiculares en los que se dibujará la sección guía.
2. Dibujo de los Sketches
3. Creación del tubo utilizando la herramienta 'Multi- Section Solid'
4. Unión del tubo con la caja del pedalier



El primer paso consiste en crear los cuatro planos en los que se van a dibujar los perfiles guía. Para juntar este nuevo con la caja del pedalier se va a usar el Sketch más cercano y con la herramienta Pad se juntarán.

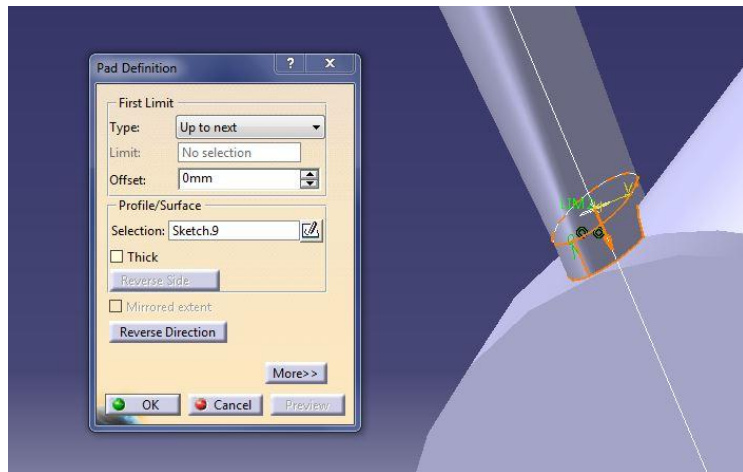
Los planos están situados a una distancia del centro de la caja del pedalier de 25.856 mm, 87.747 mm, 192.257mm y 580 mm. El perfil será circular en el extremo más lejano con un diámetro de 30,9 mm y se irá convirtiendo en elíptico paulatinamente con unos radios mayor y menor de 32.177 mm y 3.026 mm.



Para que la herramienta 'Multi-Section Solid' funcione de manera correcta es necesario tener además de los Sketches que componen la sección del tubo, unas curvas guía que los unan en caso de que no sean elípticos o redondos. En este caso no serán necesarias las mencionadas curvas guía. Esta opción de creación de sólidos permite también hacerlo cuando la curva guía no sea recta. Es la alternativa a 'Rib' cuando los perfiles son variables.

Finalmente, utilizando la herramienta Pad desde el extremo más cercano a la caja del pedalier y seleccionando la opción 'Up To the next' quedan unidos y los tubos.

De esta forma queda bien definido el cuadrilátero principal. Más tarde se realizarán los redondeos correspondientes en la unión de los tubos con el de dirección con el fin de que tenga una forma más moderna y gracias a que se va a fabricar con materiales compuestos, crear moldes con esas formas no supondrá mucha complicación.



1.6.3.5 Vainas

En este diseño las vainas inferiores no son de perfil redondo ni elíptico mientras que las superiores sí. Para dibujarlas el proceso va a ser similar al seguido en el cuadro y las herramientas las mismas. La única novedad es que hay que crear agujeros para poder colocar la rueda trasera.

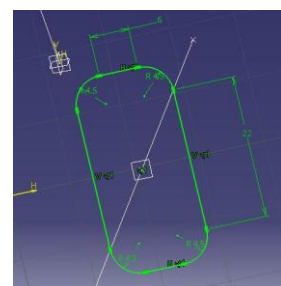
Vainas inferiores

Para crear esta parte es necesario trazar una línea por medio de dos puntos. La necesidad del espacio para que quepa la rueda en la zona más cercana a la caja del pedalier y el tubo del sillín obliga a que los puntos de los que parten los soportes de las vainas estén a 21 mm del centro de la caja del pedalier. Los puntos que marcan el final de la vaina también están desplazados en el eje X 65 mm. Con esta separación se crea el espacio suficiente para alojar el eje de la rueda más los piñones que lleva incorporados. Tanto estos puntos como los otros se ponen introduciendo sus coordenadas.

La sección de la vaina no es constante por lo que se va a dibujar por tramos, combinando las herramientas Pad y Multi-Section Solid, debido a su cambio de sección. En la siguiente captura se puede ver la forma final de la vaina y los tramos en que se divide.

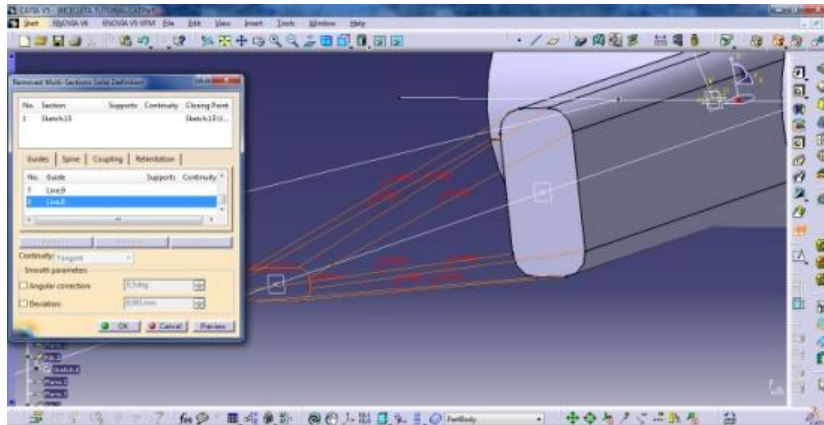


1- El primer tramo consiste en un plano perpendicular a la línea guía en el que se ha dibujado un rectángulo (22 mm x 6 mm) con las esquinas redondeadas ($r=4,5$ mm).



Una vez dibujado se extruye usando Pad hasta la caja del pedalier.

2- En el punto medio se crea otro plano en el que se dibuja otro rectángulo (10 mm x 2 mm) y cuyas esquinas están redondeadas ($r=2$ mm). Para el cambio de sección, se necesitan ocho guías que unan los puntos de ambos Sketches y así Multi-Section Solid pueda crear sin errores el sólido. Los ocho puntos necesarios son los que Catia crea al dibujar los redondeos en las esquinas.



3- Con Pad existe la opción de extruir hasta un plano así que se crea uno a 367.2 mm del inicio de la línea y se extruye el Sketch 2 hasta ahí.

4- En un punto a 390 mm del inicio de la línea se crea un plano y en él un Sketch que contiene un rectángulo (7 mm x 4 mm) con las esquinas redondeadas ($r= 3,5$ mm) para volver a unir los ocho puntos nuevos con el final del Pad anterior y así volver a crear un sólido con Multi-Section Solid.

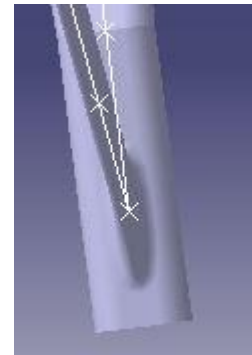
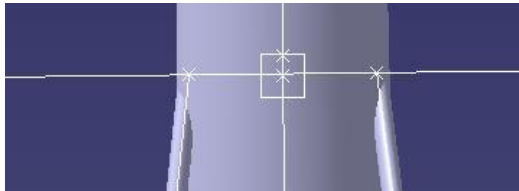
5- Finalmente se extruye con Pad este Sketch hasta un plano creado en el punto final de la línea y se le añaden 19 mm más en el apartado 'offset'.

Este añadido de 19 mm permite crear el agujero donde irá alojado el eje de la rueda. Las formas elegidas para las vainas le dotan de una mayor resistencia en la zona más cercana a la caja del pedalier ya que será la que más sufra los momentos generados al flexionarse la barra. Gracias a los materiales compuestos se puede reducir su espesor, y por consiguiente, su tamaño sin que afecte a su resistencia final.

Vainas superiores

Las vainas superiores unen el tubo del sillín con las vainas inferiores y tienen como objetivo dotar de rigidez al cuadro. Como trabajan a compresión no hace falta que tengan una sección excesivamente grande ya que el resto del cuadro aguanta bien. También tienen como objetivo facilitar la colocación de los frenos traseros ya que de otra manera tendrían que ir incrustados en el tubo del sillín y no hay tanto espacio.

El proceso de dibujo vuelve a ser muy parecido al del tubo del sillín. La sección del tubo va a ser siempre elíptica aunque a partir de un punto los radios van a variar. Los puntos que van a ser utilizados para crear eje de estas vainas están situados en el tubo del sillín y en las vainas inferiores. Los del tubo del sillín se encuentran en su plano medio a 40 mm del extremo superior de su eje y a 14 mm en la dirección perpendicular. Los que están situados en la vaina se hallan en la intersección entre la cara plana la perpendicular a ella por el punto final de la línea guía.

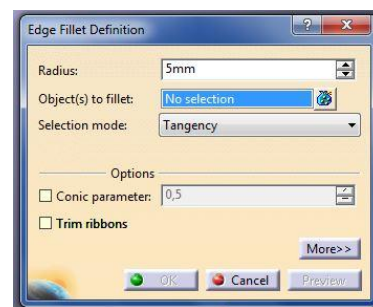


Una vez creada este eje de la vaina superior, se crean dos planos perpendiculares para poder dibujar los cambios de sección además del Sketch que se dibujará en la cara de la vaina inferior en la que se juntan ambas. Así pues, con la herramienta Multi-Section Surface se unen estos tres nuevos Sketches, sin necesidad de curvas guías entre ellos ya que son curvas y finalmente con Pad se extruye hasta el tubo del sillín el sólido.

1.6.3.6 Redondeados en uniones

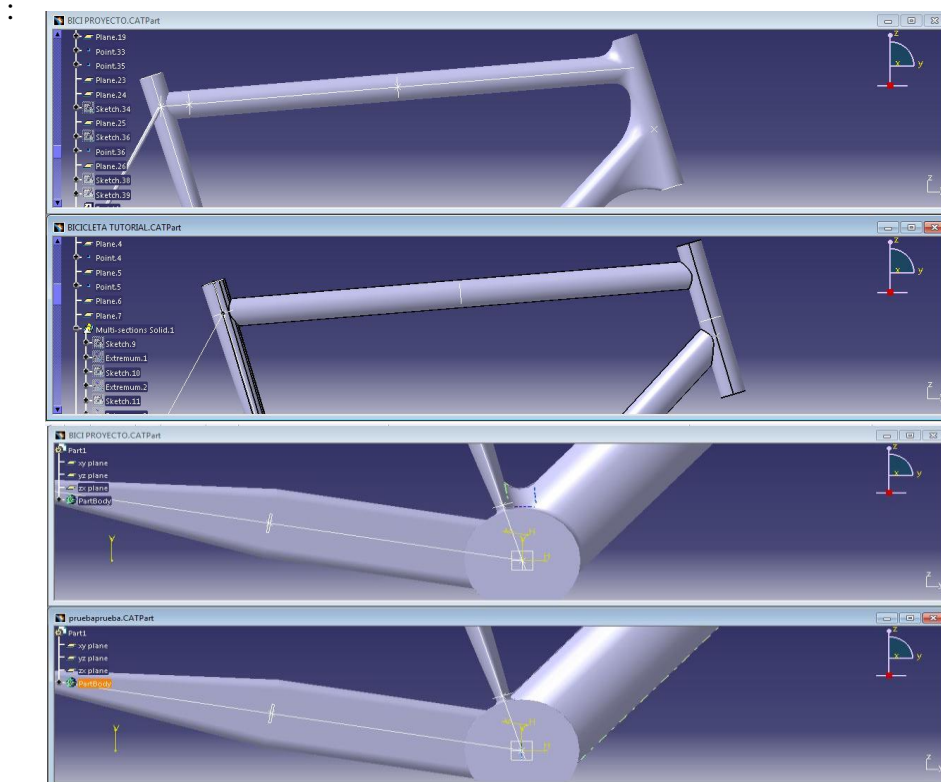
Gracias a los materiales compuestos, es posible crear uniones entre tubos redondeadas y con formas geométricas más curvas que si se trabajase con metales ya que al fabricarse con un molde no es necesaria la soldadura. Es por esa razón por la que se van a utilizar redondeos en todas las uniones .

Catia ofrece la posibilidad de redondear esquinas, achaflanarlas y jugar con los radios. Para activar esta opción basta con pulsar el botón y se abre un cuadro en el que se puede escoger el radio de redondeo y los objetos en los que aplicarlo.



Para el redondeo del tubo horizontal con el tubo de dirección el valor del radio es 21 mm y para el tubo diagonal 71 mm. En estos dos casos es necesario indicarle al programa que los bordes del tubo de dirección han de permanecer invariables.

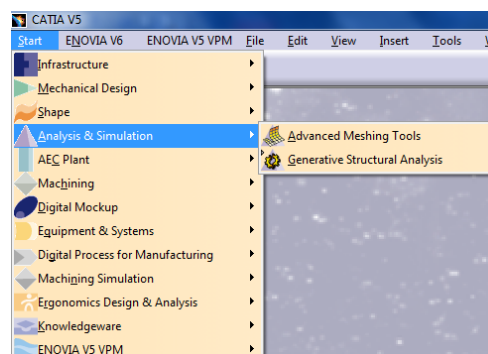
Los otros redondeos se encuentran entre el tubo del sillín y el diagonal con un valor de 8 mm y en la unión de las vainas con un radio igual a 2 mm. El valor en el redondeo entre el tubo del sillín y el horizontal es de 10 mm.



1.6.4 Mallado en Catia

Una vez el diseño está terminado, el propósito del proyecto es analizar cómo se va a comportar frente a las acciones externas. Para ello, se va a simular con un programa de análisis con elementos finitos. Estos programas funcionan dividiendo la pieza en cientos de miles de partes y simulando qué pasa en cada una. Al final, suma todo todos los elementos y se obtienen los resultados globales de una forma muy exacta.

El mallado del cuadro de bicicleta se va a realizar con Catia y el análisis con Marc Mentat exportando el mallado en formato .dat. Como se ha dicho anteriormente, Catia estaba dividido en módulos para realizar diferentes labores. Para el mallado, se va a utilizar el módulo 'Analysis & Simulation' que está dividido en 'Advanced Meshing Tools' y 'Generative Structural Analysis'. Aunque Catia es capaz de generar un análisis por si mismo, no es de gran precisión.

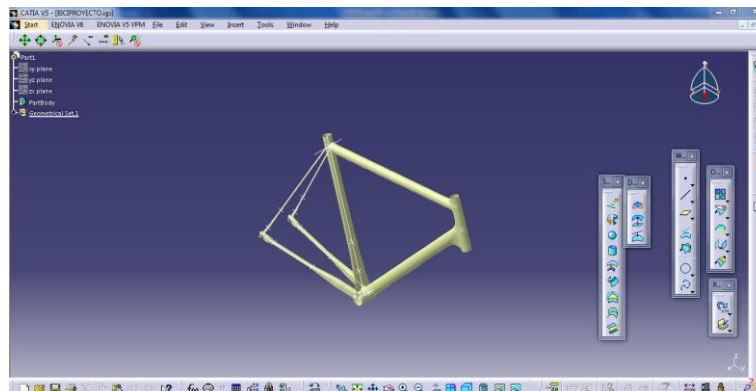


1.6.4.1 Adaptación del diseño para el análisis

Con el formato en el que se encuentra el modelo dibujado, no es posible realizar el análisis de elementos finitos suponiendo material compuesto ya que se trata de una pieza maciza. La solución pasa por conseguir obtener solamente la superficie para luego en Marc Mentat indicarle al programa las capas de material y sus espesores.

Catia ofrece la opción de dibujar sólo con superficies en el apartado 'Wireframe and Surface Design'. No se ha usado este método ya que resultaba más impreciso y complejo que si se realizaba con un Part. Por ello, la solución para transformar la pieza maciza en solo los contornos se obtiene al guardar el archivo inicial en formato .igs en lugar del formato que sale por defecto que es .CATpart. De esta forma al reabrir la pieza, Catia genera un modelo a partir del original en el que únicamente aparecen dibujadas las superficies.

Para que al abrir el archivo .igs se obtenga el resultado deseado, es necesario desactivar en Opciones, IGES, Join: Join surfaces of the model. Así pues, un tubo ahora está formado por cuatro superficies: dos tapas y dos semicilindros. Para que el modelo sea real hay que eliminar las tapas del tubo de dirección, del sillín y del pedalier, obteniendo el siguiente resultado:



Como puede observarse en la imagen, el módulo de Catia en el que se está trabajando ahora sí que es 'Wireframe and Surface Design'. Se ha abierto por defecto al trabajar con este tipo de formato.

Así como hasta ahora en el árbol desplegable de la izquierda iban apareciendo todas las operaciones, ahora salen las superficies separadas. Hay que juntarlas para poder realizar el mallado y que el programa interprete que es un único sólido. Para solucionar este problema existe una herramienta llamada 'Join'.



Al seleccionar el botón aparece un menú en el que se pueden añadir las superficies deseadas y Catia las convierte en un conjunto de manera que al posar el ratón sobre el dibujo se marca el cuadro entero.

De esta forma el diseño ya está preparado para ser abierto con 'Advanced Meshing Tools'

1.6.4.2 ¿Qué es un mallado?

Un mallado es una técnica consistente en dividir en partes muy pequeñas un objeto cuando se le quiere realizar un análisis por elementos finitos. Esos análisis pueden ser de tipo mecánico, térmico, aerodinámico, fluidos, etc...

Existen diferentes modelos de geometría para la malla: cuadrada, hexagonal, triangular...y Catia ofrece la posibilidad de mallar objetos ya sea con un sólo tipo o combinándolas.


1.6.4.3 Proceso de mallado

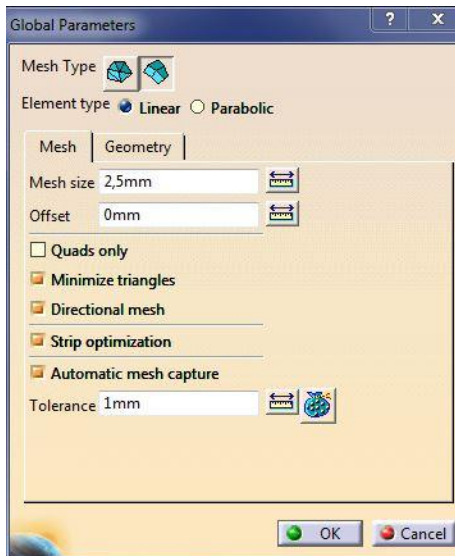
Hay que crear un mallado efectiva pero sin que sea necesario utilizar más recursos y tiempo del necesario. Para este tipo de simulaciones cuanto mayor sea el número de elementos creados en la malla más va a tardar el programa en resolverlo y operar con él. Por eso es muy necesario encontrar un equilibrio entre el tamaño de malla y la manejabilidad del programa para no tener problemas posteriores.

El hecho de que el diseño del cuadro tenga tubos de diferentes diámetros limita el tamaño mínimo de malla si se pretende que sea igual para toda la pieza y que sea un mallado efectivo. Además, como se va a fabricar en materiales compuestos, hay que elegir un tipo de malla que permita señalar al programa sin ningún problema la orientación de cada capa en cada tubo.

Para solventar estos problemas se opta por elegir un tipo de malla cuadrada, orientada en función del eje del tubo y con un tamaño de 2,5 mm en todo el cuadro salvo en las vainas superiores que es de 0.8 mm. No todo el mallado está perfectamente orientado ya que hay uniones en las que algún elemento suelto no se puede orientar de la forma deseada. Este problema no es importante ya que el número de elementos bien orientados frente a los que no lo están es muy grande. Además para evitar una cantidad mayor de estos elementos sin orientación precisa, se ha optado por realizar la simulación sobre un modelo sin redondeos. No afecta en exceso al resultado total ya que si hay menos material y aguanta, al añadir algo más por mera función estética se obtendrá un refuerzo local.

Una vez abierto el programa, aparece un entorno diferente al visto en los anteriores módulos de Catia. En este caso todas las herramientas disponibles sirven para realizar mallados de forma automática o manual. También se encuentran herramientas para el posterior análisis de la calidad del mallado y su posible optimización.

Utilizando la herramienta 'Advanced Surface Mesher'  se abre un menú en el cual se ofrecen varias opciones que facilitan el obtener un mallado direccional.

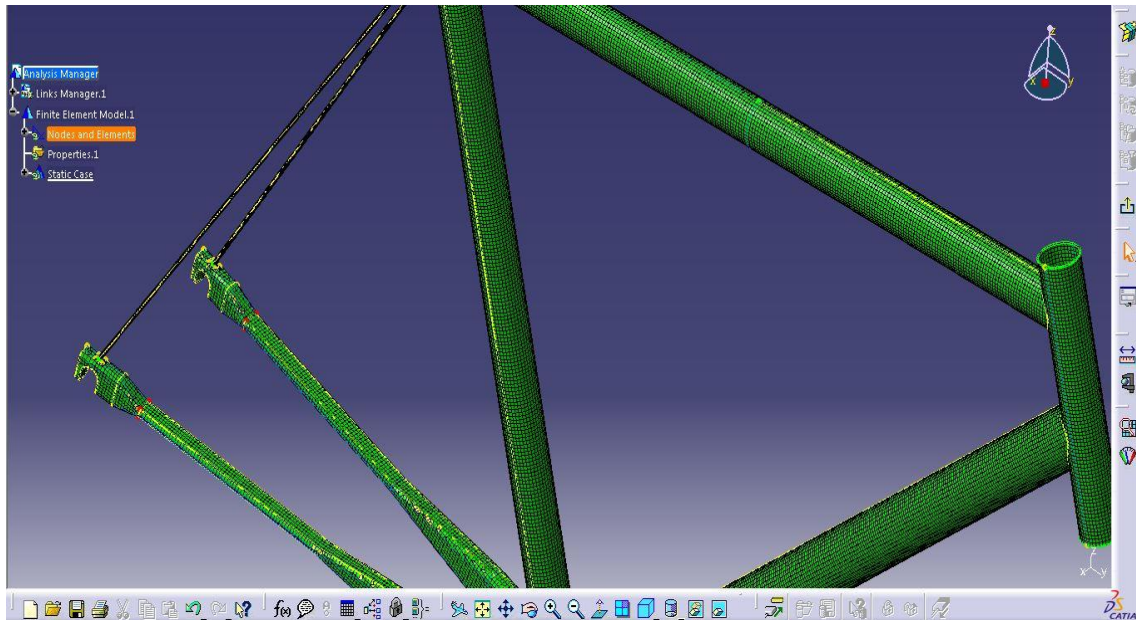


En este cuadro de diálogo se va a introducir el tamaño de malla general (después con otra herramienta se remallarán las vainas) y puesto que se busca un mallado con elementos cuadrados mayoritariamente y a poder ser orientados, se seleccionan las pestañas que ofrecen estas opciones.

Una vez completado este paso el aspecto que presenta el cuadro es una malla sin orientar con respecto a los ejes de los tubos y con las vainas superiores definidas de forma muy pobre e inexacta. Para subsanar estos errores se utiliza una barra de herramientas llamada 'Edition Tools' que contiene dos botones que van a servir para

reorientar y cambiar el tamaño de la malla a nivel local. Estas herramientas son 'Edit simplification' y 'Remesh Domain'. Para utilizar la primera basta con pinchar una línea paralela al eje del tubo y el mallado se orienta.

La segunda, ofrece la posibilidad de editar tanto el tamaño como el tipo de malla en una parte. Tras escoger el nuevo tamaño de malla, reorientar los elementos y arreglar algunos en las uniones el mallado presenta el siguiente aspecto:



Una vez completados los pasos, sólo queda guardar el archivo en formato .dat para que pueda ser interpretado por Marc Mentat y realizar la simulación.

1.7 TRABAJAR CON ELEMENTOS FINITOS

Para realizar cálculos con programas de elementos finitos, es necesario seguir unos pasos en orden para que los resultados sean buenos y fiables. Por eso, con el fin de hacer más sencillo este requerimiento, se divido el proceso total en tres partes:

- **Preproceso:** En este apartado se malla la pieza con la minuciosidad adecuada en función de los resultados que se quieran obtener. Una buena calidad de malla repercutirá en el resultado final positivamente. También, este es el momento de introducir las propiedades del material, el tipo de elemento y las fuerzas que actúan sobre el cuerpo.
- **Cálculos:** El ordenador una vez que ya tiene introducidos los datos necesarios realiza las simulaciones, en las cuales dependiendo del tamaño de malla y la velocidad del procesador, puede llegar a tardar horas. Es por este motivo por el que las grandes empresas e industrias que trabajan simulando todo tipo de fenómenos físicos poseen grandes ordenadores.
- **Postproceso:** Aquí entra en juego la importancia del conocimiento de las personas. Hasta ahora, cualquiera podía aprender a introducir datos y darle al botón de calcular. Ahora el ordenador vuelca de golpe toda la información que se le ha pedido y es el momento de analizarla con precisión y sabiendo elegir qué resultados son más importantes. Esta información viene en forma de mapa de color, gráficas, tablas...etc.

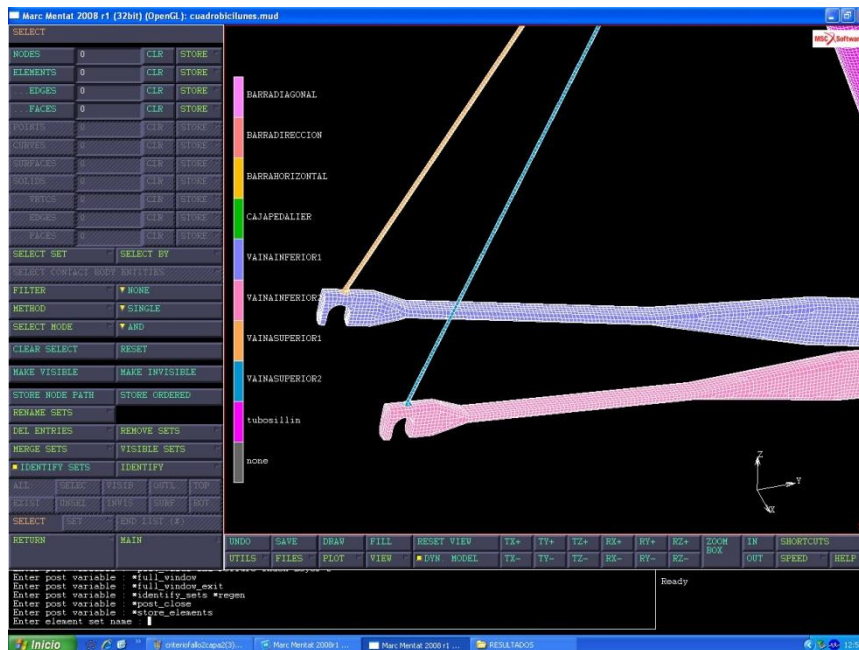
1.7.1 Preproceso en marc mentat

Se va a explicar un poco cuál es el orden de introducción de los datos en el preproceso de Marc. En este caso, la malla no se crea con Marc sino que se exporta desde Catia. Esto acorta el tiempo que se tarda en realizar el preproceso ya que Catia es más rápido a la hora de crear este paso.

Con la malla no se puede operar directamente si se trabaja con según que materiales. Como el secreto de los materiales compuestos es la orientación, habrá que ordenar los elementos de forma que estén orientados según una referencia y a la hora de diseñar los ángulos de las capas no haya problemas. La dirección de referencia va a ser la del eje de los tubos.

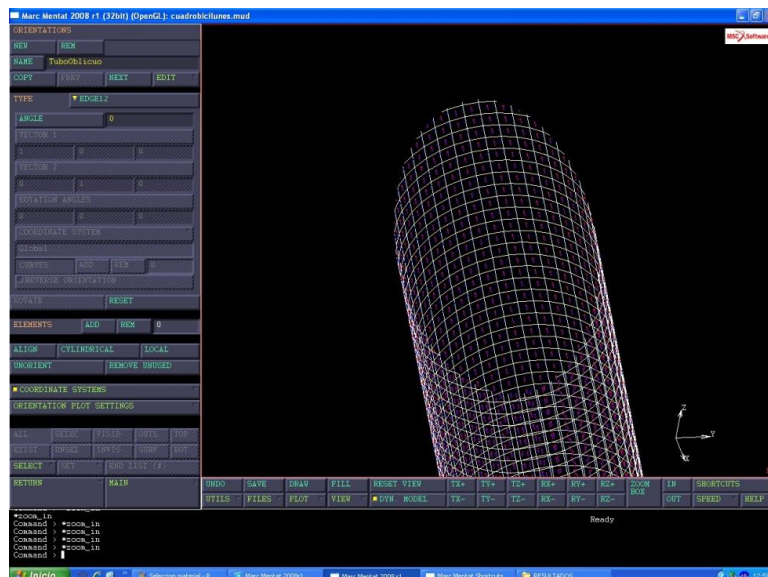
Como no todos los tubos tienen la misma dirección y se quiere orientarlos según la de su eje, hay que dividir el mallado en 9 **sets diferentes**. Vainas, caja del pedalier y tubos suman los 9. Un set es un subconjunto de elementos. Con esta opción es más fácil realizar cambios en las partes del mallado sin que afecte a otras no deseadas.

Una vez el cuadro está dividido en los 9 sets, presenta este aspecto:

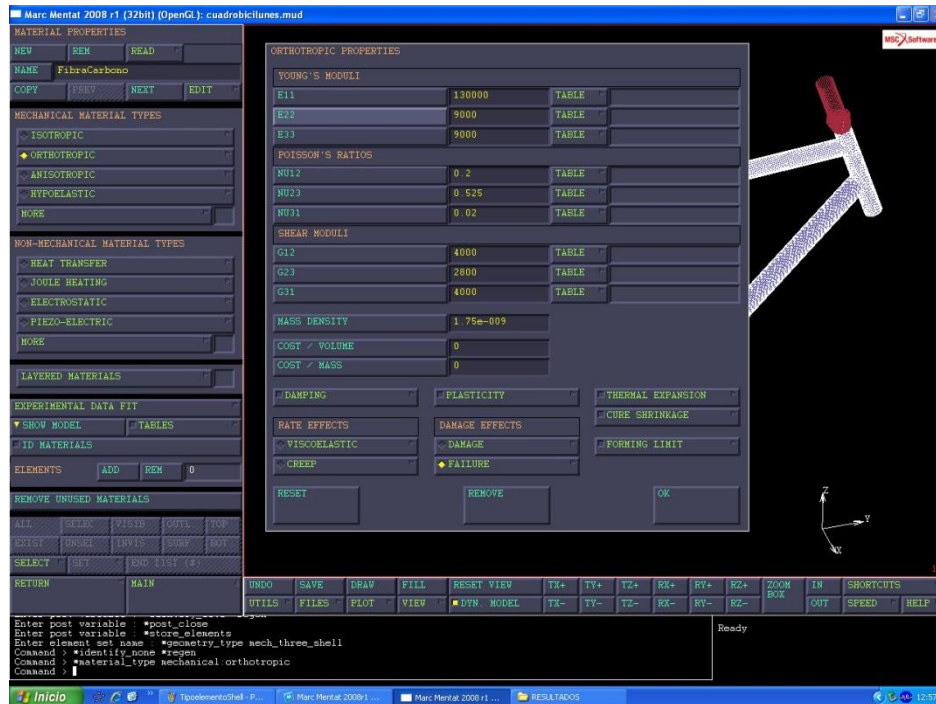


Cada color representa un set diferente y hay uno por barra. Ahora que ya está la malla dividida correctamente, hay que asignar qué tipo de elemento será cada uno. Se elige uno de tridimensional de tipo Shell. Este elemento se utiliza cuando una dirección es predominante frente a la otra. Por ejemplo, longitud del eje frente al espesor. Todos los elementos de la malla presentan esta característica así que se seleccionan todos los elementos y se les asigna esta propiedad.

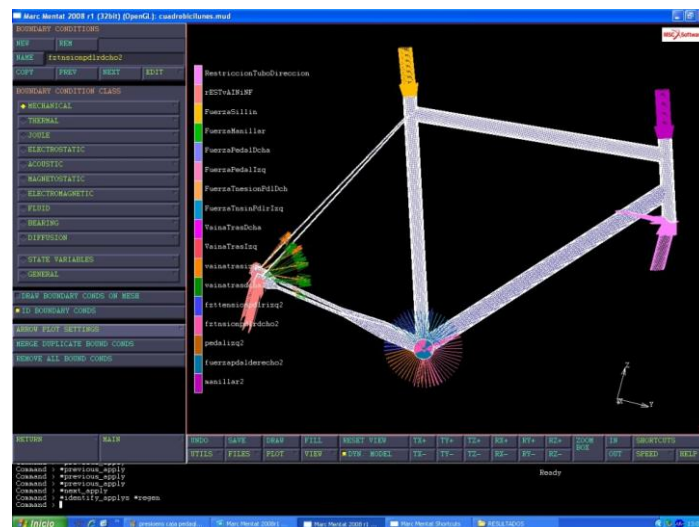
Una vez determinado esto, es hora de orientarlos según la dirección longitudinal. Otra vez hay que realizar este paso set a set, o lo que es lo mismo barra a barra. Marc orienta los elementos según un montón de parámetros diferentes. Para este caso, como los elementos son cuadrados, se va a utilizar una de las direcciones que sean longitudinales. Una vez orientados, presentan una flecha roja en el centro indicando su dirección.



El siguiente paso es la creación del material. Marc ofrece una opción 'Composite' en la que permite combinar materiales sueltos creados anteriormente para formar uno nuevo en la proporción y orientación que se desee. Al abrir la pestaña de nuevo material, Marc requiere la introducción de las propiedades mecánicas (módulo de Young, modulo de Poisson, densidad...etc) y las presiones de rotura para poder elaborar ciertos criterios de fallo.



Ya solo queda aplicar las restricciones y las solicitaciones que actúan sobre la pieza. Eso se hace en el apartado 'Boundary conditions' donde hay una amplia lista para elegir el tipo de sollicitación: fuerza puntual, presiones, cargas térmicas, eléctricas, etc... Una vez se han elegido, la pieza presenta el aspecto siguiente:



1.8 MATERIALES COMPUESTOS

Los composites han estado siempre presentes en el entorno del ser humano y no ha sido hasta este último siglo el momento en el que se han empezado a fabricar. La madera, el bambú y diversos tejidos han formado parte fundamental de nuestra historia. Los huesos son otro tipo de composites y también son una parte vital. Este tipo de materiales está formado por dos distintos que cuando se juntan forman un producto con unas propiedades superiores a las que tenían sus constituyentes.

La historia del ser humano y la creación de composites comienza a principios del siglo XX de la mano del químico belga Baekeland. Aplicó calor y presión a una resina líquida formada por dos componentes y cuando polimerizó tomó la forma del recipiente. Había creado la bakelita. Poco después, durante los años 30 se comenzaron a fabricar las primeras piezas ligeras que no estuviesen sometidas a grandes solicitaciones mecánicas.

A mediados de siglo se inventó el enrollamiento filamentario así como también se descubrieron la mayoría de procesos que actualmente se usan para crear los materiales compuestos. Poco a poco fueron ganando utilidades y aplicaciones y la industria militar no tardó en usarla en el diseño de algunas piezas de aviones y barcos. La NASA no se quedó atrás y también comenzó a usar estos materiales en sus transbordadores espaciales. El siguiente paso de los materiales compuestos fue en la década de los 80 cuando se empezó a fabricar material deportivo profesional: raquetas, palos de golf, remos, etc... eran una serie de objetos en los que las propiedades de algunos composites encajaban perfectamente.

Uno de los grandes impulsores de los materiales compuestos ha sido el mundo del automovilismo de competición. La Fórmula1 empezó en los años 90 a crear los chasis de los monoplazas en fibra de carbono y en la actualidad salvo el motor todo está compuesto de composites: chasis, suspensiones, frenos, apéndices aerodinámicos...etc. Gracias a estos avances puestos a prueba en el laboratorio de las carreras, hoy en día los coches de alta gama ya incorporan esta tecnología y gran parte de sus componentes son fibra de carbono.

Actualmente los usos de este tipo de materiales no conocen limitaciones. La aeronáutica es una de las grandes beneficiadas y todos los aviones están formados en un alto porcentaje de fibra de carbono. También se usan en los objetos del día a día como por ejemplo los neumáticos de cualquier vehículo, algunas prendas de vestir, etc. Gracias a la revolución de los materiales la humanidad ha dado un gran paso y todavía quedan muchas aplicaciones más. Los composites ya son una parte importante de nuestra vida diaria y su uso promete un futuro brillante para la humanidad.

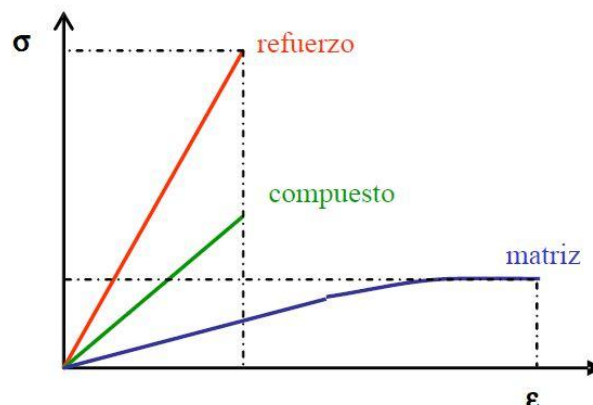
Desde el punto de vista económico los composites siempre han sido caros y por eso han sido los equipos de competición profesionales o los organismos gubernamentales los responsables de su desarrollo. Sin embargo ya no son tan inaccesibles para la mayoría

de la gente y se está empezando a fabricar mucho material deportivo con este tipo de materiales, aunque su precio no deja de ser más caro que el resto.

1.8.1 Conceptos previos

- **Composite:** Es una mezcla como entidad única de dos constituyentes distintos, matriz y refuerzo, separables físicamente a escala macroscópica, y cuyas propiedades mecánicas finales resultan mejores que las de los elementos que lo forman.
- **Matriz:** Material voluminoso, isótropo y continuo con el que se combina el refuerzo.
- **Refuerzo:** Material que aporta las propiedades mecánicas al composite. Ha de ser mucho más resistente y rígido que la matriz.
- **Termoplástico:** Son los polímeros que al calentarse hasta la temperatura de transición vítrea se vuelven elástico y adquieren la capacidad de deformarse plásticamente sin romperse.
- **Termoestable:** Polímero que al calentarse se quema y se degrada.
- **Materiales constituyentes:** Tanto la matriz como el refuerzo pueden construirse en multitud de materiales. Los más significativos son metales, polímeros o cerámicos

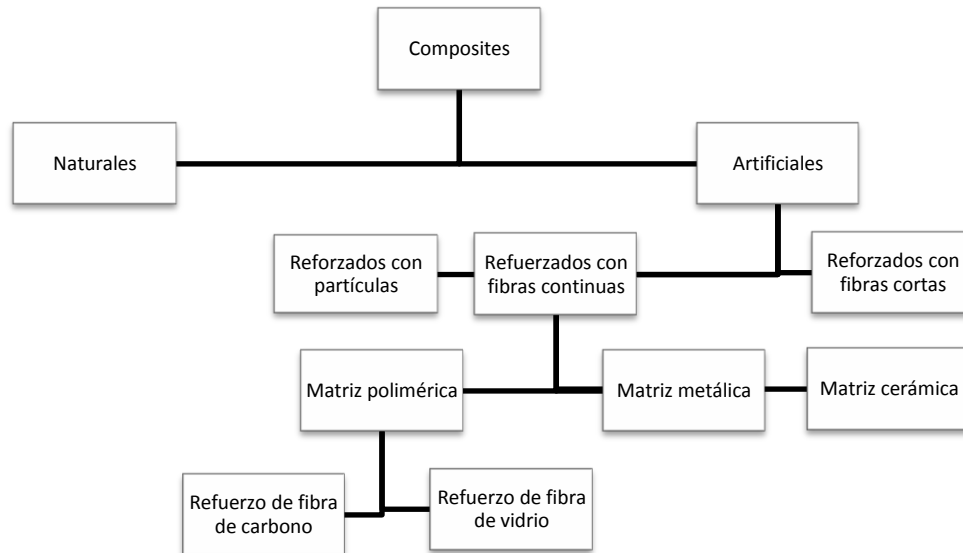
La siguiente gráfica ilustra las definiciones anteriores



La suma de la matriz y el refuerzo adecuado consigue obtener un material compuesto con unas propiedades mecánicas superiores a las de los constituyentes.

1.8.2 Clasificación de los composites

La cantidad de posibilidades a la hora de mezclar los materiales es muy grande. Esta mezcla se puede realizar con una gran diversidad de materiales y si se hace una clasificación con ese criterio resulta los siguiente:



1.8.3 Propiedades de los constituyentes de los composites reforzados

En este apartado se van a estudiar por separado las propiedades de las que disponen tanto los refuerzos como las matrices. Primero se van a explicar las características de los refuerzos de fibras continuas, después los refuerzos de fibras cortas y finalmente los tipos de matrices. Así cobrará sentido el esquema anterior. Sólo comprendiendo cómo es la estructura interna del material se podrán estudiar las propiedades físicas y mecánicas de los laminados que es con lo que se va a trabajar finalmente.

Existen fibras de tres tipos: Poliméricas, metálicas y cerámicas. Cada una tiene unas características diferentes y según el uso al que se vaya a destinar el composite habrá que elegir la adecuada.

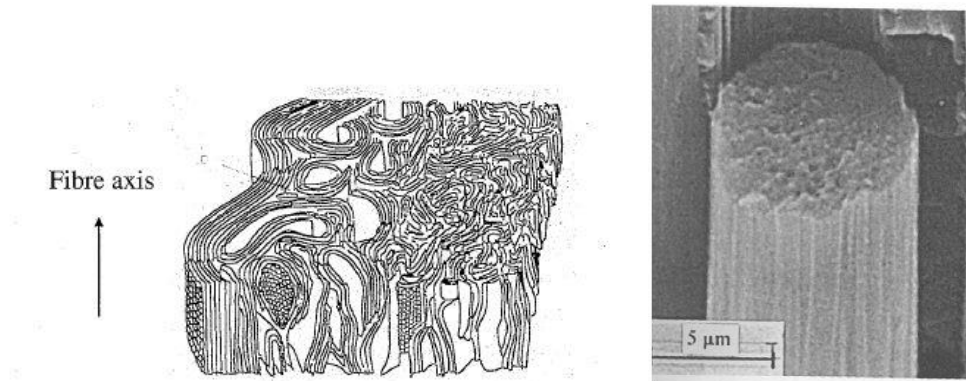
1.8.3.1 Fibras

Fibras poliméricas

- **Filamentos de carbono**

Los filamentos contienen desde un 80% hasta un 95% de átomos de carbono y su diámetro suele ser de unos 8 μm . La estructura está compuesta por planos basales hexagonales apilados. Los enlaces en los planos en la dirección de la fibra son covalentes y muy fuertes mientras que en dirección radial entre los planos basales son más débiles y de tipo Van der Waals. Esto hace que se presente una anisotropía muy

grande y que su módulo elástico en plano sea más de 25 veces mayor que en perpendicular.



- **Fibra de vidrio**

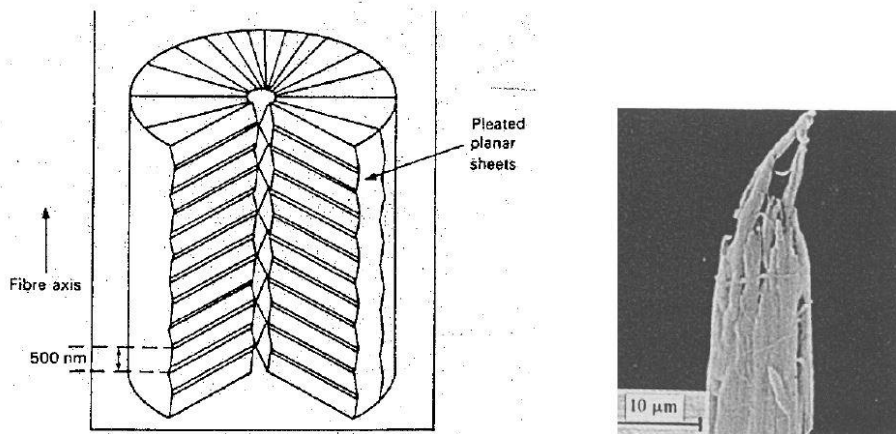
Está compuesta por unos filamentos amorfos e isótropos formados de óxido de silicio y cuyo diámetro típico suele ser de unos 12 μm . Existen varios tipos de clases: E (electric) S (strength) y C (corrosión). Su módulo de Young oscila entre los 70 y 85 GPa según sea la composición.



- **Fibra de aramida**

Las fibras de aramidas son también conocidas como poliamidas aromáticas. Existe una gran anisotropía del orden de 10 veces entre el módulo de elasticidad longitudinal y en dirección radial. Poseen una gran resistencia a la tracción y una alta tenacidad. Su estructura está compuesta por unas largas micro-cadenas moleculares paralelas al eje con enlaces covalentes que le da una gran resistencia a la tracción y con enlaces débiles en la dirección radial. Tienen tendencia al pandeo y su resistencia al impacto es muy grande ya que la energía se disipa rompiendo las fibras y gracias a su alta tenacidad cuesta mucho.

Dos ejemplos de este tipo de fibras son el Kevlar 29 y el Kevlar 49.



Fibras metálicas

- **Fibra de boro**

Se dispone en forma de monofilamentos cuyo diámetro más común es de 100-140 μm . Estas fibras son muy duras y frágiles por lo que los composites que las llevan son difíciles de taladrar y mecanizar.

Otros ejemplos de fibras metálicas son las fibras de aluminio, titanio o acero.

Fibras cerámicas

- **Alúmina**

Está compuesta por óxidos inorgánicos, generalmente alúmina y sílice. Cuanto menor sea el contenido de sílice, mayor resistencia a la temperatura y módulo de elasticidad tendrá la fibra.

- **Carburo de silicio**

Su estructura es similar a la del diamante. Posee una baja densidad, alta resistencia y rigidez.



A continuación una tabla que resume y ordena algunas de las propiedades más importantes y los usos de estas fibras.

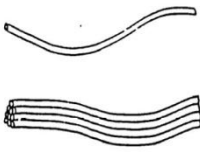


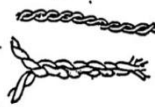
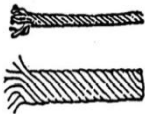
Material	Diameter μm	Density g/cm^3	Tensile strength MPa	Tensile modulus GPa	Strain at fracture %	σ_t/ρ	E_t/ρ	Major application
Carbon (HM)	8	1.95	2200	390	0.8	1128	200	structure
Carbon (HS)	8	1.75	2700	250	1.5	1543	143	structure
E-glass	12	2.56	2200	70	2.4	859	27	structure & ballistic
S-glass	12	2.50	3600	80	5.7	1440	32	structure & ballistic
Kevlar 29	12	1.43	3600	100	5.2	2517	70	structure & ballistic
Kevlar 49	12	1.45	3600	120	2.5	2483	83	structure & ballistic
Kevlar 149	12	1.47	2900	185	1.5	1973	126	structure & ballistic
Spectra 1000	27	0.97	3000	101	2.7	3093	104	ballistic
Dyneema	38	0.97	2700	87	3.5	2784	90	ballistic
Nylon 66	20	1.14	990	6	23.0	868	5	ballistic
Alumina	20	3.90	1600	390	0.2	410	100	structure
Silicon carbide	140	3.00	4000	400	0.1	1333	133	structure & ballistic
Boron	100	2.60	3600	400	0.2	1385	154	structure

1.8.3.2 Maneras de disponer las fibras

Sea cual sea el material, las fibras han de combinarse de alguna manera. Existen diferentes posibilidades:

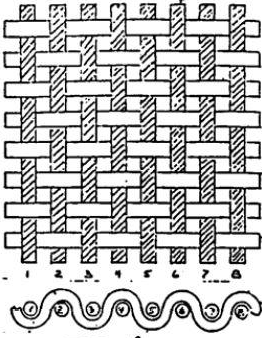
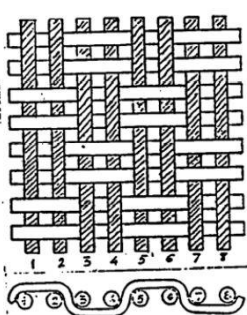
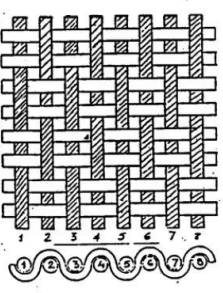
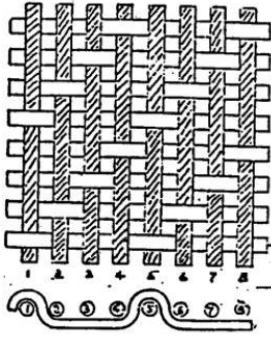
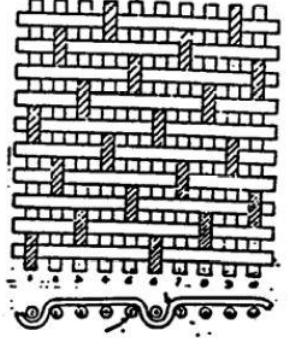
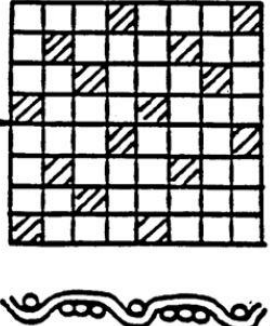
- **Hilos**

Se pueden crear múltiples hilos a partir de otros más finos

Filamentos continuos	Fibras cortadas	Filamentos continuos unidos sin torsión	Hilos retorcidos juntos	Muchos hilos doblados juntos
				
a	b	c	d	e

- **Tejidos**

Los hilos se hallan enlazados perpendicularmente y según la forma de cruzarse los tejidos se llamarán:

A) Tafetán	B) Esterilla	C) Semiesterilla
 <p>FIG. A</p>	 <p>FIG. B</p>	 <p>FIG. C</p>
D) Sarga	E) Raso	F) Satén de espiguilla
 <p>FIG. D</p>	 <p>FIG. E</p>	 <p>FIG. F</p>

En esta tabla se aprecia cómo están entrelazados los hilos y gracias al corte realizado debajo de la imagen se ve el orden.

1.8.3.3 Matrices

La matriz está compuesta por una resina que puede ser de diferentes tipos. Su rol principal es sujetar y proteger las fibras de los agentes externos. También ayudan a transferir correctamente las cargas y en caso de rotura de una fibra a evitar que se propague a lo largo del material. Al ser poco densas aportan ligereza. Por lo tanto, las resinas han de tener buen comportamiento mecánico y físico además de ser fiables, duraderas y fáciles de procesar.

Existen matrices de tipo polimérico, metálico y cerámico aunque las más usadas son las primeras.

- **Matrices de epoxi**

Son termoestables y poseen unas elevadas prestaciones. No requieren condiciones especiales de curado aunque durante el proceso se contraen un poco. Tienen múltiples aplicaciones en forma líquida o pastosa y son resistentes a los agentes externos.

En general tienen unas buenas propiedades mecánicas aunque son algo frágiles. Resiste mayores esfuerzos de compresión que de tracción y son compatibles con las fibras de carbono, cristal y aramidas.

Epoxy grade	Density g/cm ³	Tensile strength MPa	Tensile modulus GPa	Strain at failure %	Compressive strength MPa	Shear modulus GPa	Toughness J/m ²	T _g °C	Manufacturer
914	1.29	47.7	3.9	1.5	180	1.4	103	190	Hexcel
920	1.22	34.9	3.76	8.4	290	-	541	107	Hexcel
924	1.30	65	3.8	2.4	175	-	150	190	Hexcel
8551-7	1.29	99.3	4.1	4.4	-	-	96	157	Hexcel
8552	1.31	120.7	4.67	4.0	-	-	-	195	Hexcel

• Matrices de poliéster

Sus propiedades son parecidas a las del epoxi aunque algo peores. Son termoplásticas y experimentan una mayor retracción durante el curado. Por otra parte su coste es menor y su procesamiento más fácil y es compatible con la fibra de vidrio.

• Matrices de vinilester

Las propiedades de este material son algo mejores que las del poliéster aunque requiere un procesamiento más complejo. La retracción durante el curado es bastante grande y las fibras con las que mejor funciona son las de aramida.

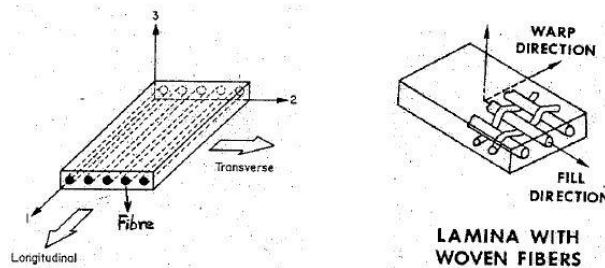
Material	Density g/cm ³	Tensile strength MPa	Tensile modulus GPa	Strain at failure %	Compressive strength MPa	T _g °C
Epoxy	1.1 - 1.4	30 - 100	3 - 6	1 - 6	100 - 200	65 - 200
Polyester	1.3 - 1.5	40 - 90	2 - 5	1 - 6	90 - 250	> 70
Vinyl ester	1.1 - 1.2	70 - 80	2 - 3	3 - 8	-	> 70
Phenolic	1.3	35 - 60	5 - 7	1 - 2	-	> 120
BMI	1.21	40 - 110	3.6	1 - 3	-	220 - 300
Polyimide	1.4 - 1.9	100 - 110	3 - 5	1 - 3	-	270 - 350
PEEK	1.4	95	3.9	> 10	-	120 - 150
Nylon 6,6	1.1	82	1.2	4	-	75

Además de estos tres materiales para fabricar las matrices existen muchos más: fenoles, poliamidas, vinilésteres, nylon...etc. Las matrices pueden ser también de tipo metálicas y cerámicas. Aluminio y titanio sirven como metálicas mientras que alúmina y vidrio son cerámicas.

1.9 LAMINAS Y SUS PROPIEDADES

Una lámina es la parte básica de un laminado que resulta al combinar la matriz con las fibras.

Dentro de la lámina las fibras pueden estar o bien todas en una dirección (laminado unidireccional) o en perpendicular formando un tejido.



El producto final fabricado con laminados de material compuesto está compuesto por varias laminas cuyas fibras están orientadas en diferentes direcciones y que están unidas entre ellas. De esta forma, sabiendo las propiedades del material y las solicitaciones, será posible variar las orientaciones para obtener la configuración adecuada.

1.9.1 Propiedades mecánicas de una lámina

Para describir el comportamiento de un material es necesario plantear la Ley de Hooke. Esta ley relaciona las deformaciones que se dan en un material en función de las cargas que se apliquen. No todos los materiales tienen las mismas respuestas en todas las direcciones, es decir, no son isótropos. Algunos materiales compuestos son ortótropos y eso hace que a la hora de realizar cálculos haya que tener más consideraciones en cuenta.

La ley de Hooke se expresa

$$\sigma = E\epsilon$$

La ley de Hooke generalizada tiene la siguiente forma:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix}$$

Esta ley es la más general para un material anisótropo linealmente elástico. Son necesarias 36 componentes para definir un material que no presenta simetría alguna (triclínico). Debido a consideraciones termodinámicas, la matriz de rigidez es simétrica por lo que solo 21 de las 36 constantes elásticas son independientes.

1.9.2 Simetrías en los materiales

Según el tipo de simetría existente en el material, la matriz de rigidez variará su número de constantes.

- **Simetría ortótropa**

Si existe simetría en tres planos ortogonales el material se denomina **ortótropo**. El número de constantes se ve reducido a 9 aunque si los planos de simetría coinciden con el sistema de coordenadas, el número de constantes se amplía a 12.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix}$$

- **Simetría transversalmente isótropa**

En este caso de simetría la matriz de rigidez tiene 5 constantes. Existe una dirección preferente y cualquier sección perpendicular es igual mecánicamente en cualquier punto. Si el plano de isotropía coincide con uno de los planos del sistema de coordenadas, las componentes distintas de cero en la matriz de rigidez son 12. Según coincidan los planos de simetría con el sistema de coordenadas en mayor o menor medida el número de componentes distintas de cero variará pero sus constantes independientes siempre serán 5.

Este tipo de simetría permite plantear:

$$C_{22} = C_{33} \quad C_{13} = C_{12} \quad C_{55} = C_{66} \quad C_{44} = \frac{(C_{22} - C_{23})}{2}$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{(C_{22} - C_{23})}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix}$$

- **Simetría isótropa**

En este caso, el número de constantes independientes se ve reducido a 2. Todas las propiedades del material son constantes y no varían según la orientación. En la matriz existen doce constantes distintas de cero.

Así pues

$$\begin{aligned}
 C_{11} &= C_{22} = C_{33} \\
 C_{12} &= C_{23} = C_{31} \\
 C_{44} &= C_{55} = C_{66} = \frac{(C_{11} - C_{12})}{2}
 \end{aligned}$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{21} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (C_{11} - C_{12})/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (C_{11} - C_{12})/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (C_{11} - C_{12})/2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix}$$

Como conclusión a este apartado es necesario señalar que gracias a la presencia de planos de simetría o a la correcta orientación de los ejes de referencia se puede simplificar la matriz de rigidez para convertirla en otra más simple y manejable.

Análogamente, si se quieren conocer las tensiones a través de las deformaciones es necesario despejar este vector. La nueva matriz resultante, inversa de la de rigidez, será la de flexibilidad y seguirá el mismo modelo que la de rigidez para determinar su número de componentes independientes y distintas de cero.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix}$$

1.9.3 Estado tensional plano

Este estado se da frecuentemente en los problemas que se abordan en ingeniería y significa que la tensión sólo existe en un plano y la perpendicular a este se desprecia.

Se pueden suponer las capas de material ortótropas y en un estado de tensión plano. Con esas premisas y desarrollando la matriz de la ley de Hooke para un material ortótropo:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_3 = \tau_{23} = \tau_{31} = 0 \\ \sigma_1 = C_{11}\varepsilon_1 + C_{12}\varepsilon_2 + C_{13}\varepsilon_3 \quad (1) \\ \sigma_2 = C_{12}\varepsilon_1 + C_{22}\varepsilon_2 + C_{23}\varepsilon_3 \quad (2) \\ 0 = C_{13}\varepsilon_1 + C_{23}\varepsilon_2 + C_{33}\varepsilon_3 \quad (3) \\ \tau_{12} = C_{66}\gamma_{12} \quad (4) \end{array} \right.$$

Si se despeja ε_3 en (3) y se sustituye en (1) y (2) se obtiene:

$$\sigma_1 = \left(C_{11} - \frac{C_{13}C_{13}}{C_{33}} \right) \varepsilon_1 + \left(C_{12} - \frac{C_{13}C_{23}}{C_{33}} \right) \varepsilon_2 = Q_{11}\varepsilon_1 + Q_{12}\varepsilon_2$$

$$\sigma_2 = \left(C_{12} - \frac{C_{23}C_{13}}{C_{33}} \right) \varepsilon_1 + \left(C_{22} - \frac{C_{23}C_{23}}{C_{33}} \right) \varepsilon_2 = Q_{12}\varepsilon_1 + Q_{22}\varepsilon_2$$

Se deduce que simplificando y sustituyendo por Q :

$$Q_{ij} = C_{ij} - \frac{C_{i3}C_{j3}}{C_{33}}$$

Y la expresión resultante de sustituir estos valores en la matriz de rigidez, es la matriz de rigidez reducida

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{pmatrix}$$

Los valores de las Q son los siguientes

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$$

$$Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad Q_{21} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad Q_{66} = G_{12}$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix}$$

Y por lo tanto, la matriz de flexibilidad queda:

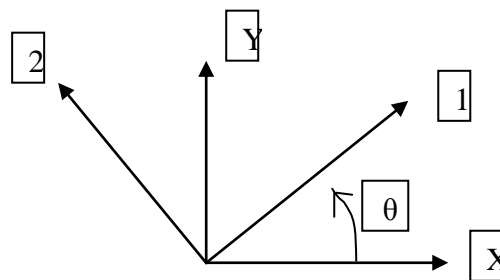
$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & 0 \\ -\frac{\nu_{21}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix}$$

En el caso de materiales isótropos los módulos de Young, los coeficientes de Poisson y los módulos de elasticidad transversal son idénticos en ambas direcciones. Sin embargo, por el hecho de ser ortótropo el material se cumple la siguiente relación.

$$\frac{\nu_{12}}{E_1} = \frac{\nu_{21}}{E_2}$$

1.9.4 Ejes de coordenadas

No siempre van a coincidir los esfuerzos a los que esté sometidos el material con los ejes de referencia. Es por lo tanto necesario definir una solución para este nuevo problema mediante un cambio de coordenadas.



Para pasar del sistema x-y al sistema 1-2 el cambio será el siguiente

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & 2 \sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -2 \sin \theta \cos \theta \\ -\sin \theta \cos \theta & \sin \theta \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{pmatrix} = [T] \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix}$$

Y análogamente con los desplazamientos

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} = [T'] \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix}$$

Siendo la matriz T' la siguiente:

$$[T'] = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & \sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -\sin \theta \cos \theta \\ -2\sin \theta \cos \theta & 2\sin \theta \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix}$$

Despejando y reordenando se llega a una nueva matriz de flexibilidad

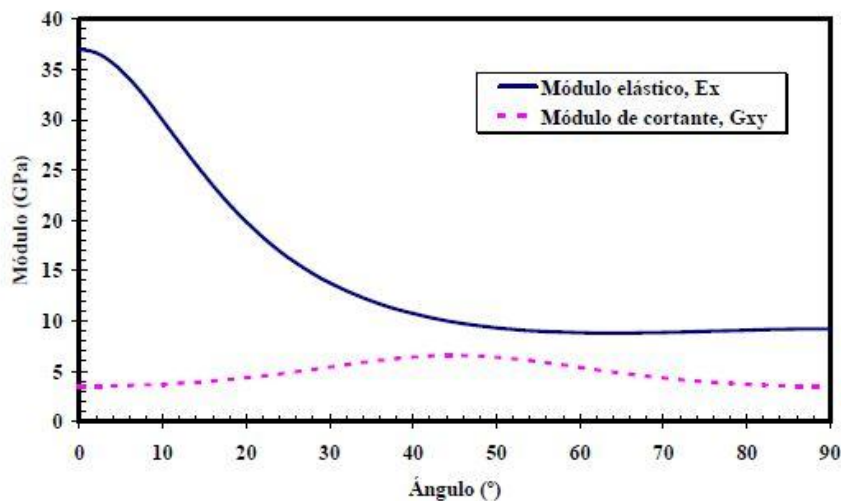
$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = [T']^{-1} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} = [T']^{-1}[S][T] \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = [\bar{S}] \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix}$$

Análogamente, expresándolo con la matriz de rigidez reducida

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = [\bar{Q}] \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix}$$

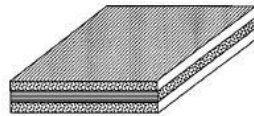
Tanto $[\bar{S}]$ como $[\bar{Q}]$ van a ser función de senos y cosenos y, por lo tanto, la orientación repercutirá en el comportamiento del material. Queda demostrado que E y G varían en función del ángulo que adopten las fibras del material y va a ser importante orientarlas de forma correcta para optimizar las propiedades mecánicas.

En la siguiente imagen se ve cómo varían las propiedades para un epoxi/50% vidrio



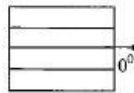
1.10 TIPOS DE LAMINADOS

Una de las grandes ventajas de los materiales compuestos es la gran combinación de materiales que se pueden emplear para formar los laminados. Un laminado es una pila de laminas unidas juntas en el proceso de fabricación, con éstas orientadas en varias direcciones. Así pues, se hace posible combinar los materiales entre si usando las propiedades más beneficiosas para el diseño que se esté buscando.

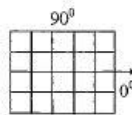


El proceso por el cual se obtienen los laminados, es conocido como laminación. Según estén orientadas sus fibras recibirán distintos nombres. Las más típicas son: Unidireccional(UD), Cross-ply (CP), Angle-ply (AP), Quasi-isótropo (QI) y Multidireccional (MD)

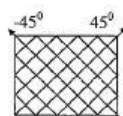
En un laminado Unidireccional todas las láminas están orientadas en la misma dirección



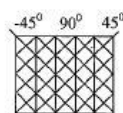
Cuando se trata de un laminado de tipo Cross-ply sus capas se disponen en direcciones perpendiculares unas con otras.



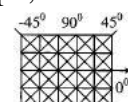
Si el laminado es de tipo Angle-ply, las capas están apiladas en un ángulo cualquiera diferente de 0 o 90 grados.



El laminado multidireccional es igual que el de tipo AP solo que también tiene capas orientadas a 0 o 90 grados, pero no ambas.



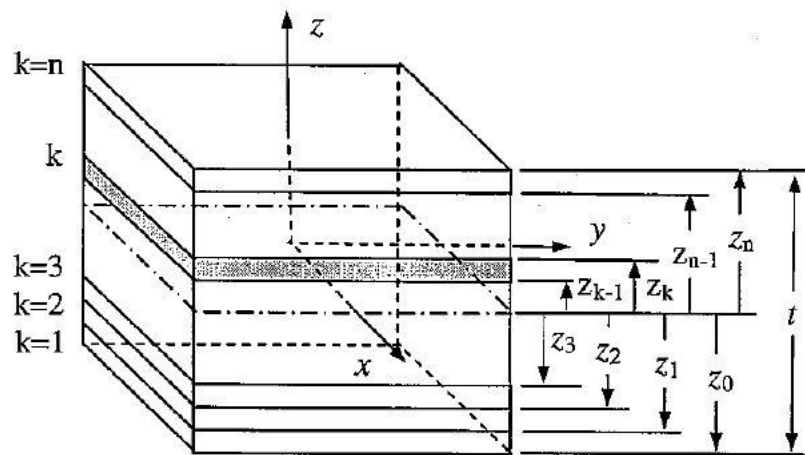
Si se trata de un laminado quasi-isótropo, tendrá capas orientadas en 0, 45 y 90 grados.



1.10.1 Nomenclatura de los laminados

Es necesario definir unas reglas para que cualquiera que tome un plano pueda saber de forma clara cómo están dispuestas las capas de fibras dentro del laminado.

- Las láminas se definen desde el exterior hacia el interior del laminado.
- Con un número se indica el ángulo que forman la fibra y se le añade un subíndice para saber cuántas láminas poseen esa orientación.
- Si el laminado es simétrico, se indicara sólo la mitad y se escribirá una S como subíndice.
- Cuando se quiere indicar que una lámina es el plano de simetría se utiliza un símbolo encima del número.



Por ejemplo, un laminado compuesto por dos laminas a 0° , dos a 90° y dos a $\pm 45^\circ$
 $[0_2, 90_2, +45, -45]_S$

U otro igual solo que con un plano de 45° y de simetría
 $[0_2, 90_2, \overline{45}]_S$

1.10.2 Teoría de los laminados

Para calcular cómo van a trabajar los laminados, se utiliza el método ya visto sólo que se adapta para que funcione cuando hay varias laminas juntas. Estos compuestos son homogéneos a escala macroscópica y para realizar estos cálculos se realizan una serie de simplificaciones, llamadas Hipótesis de Kirchhoff-Love

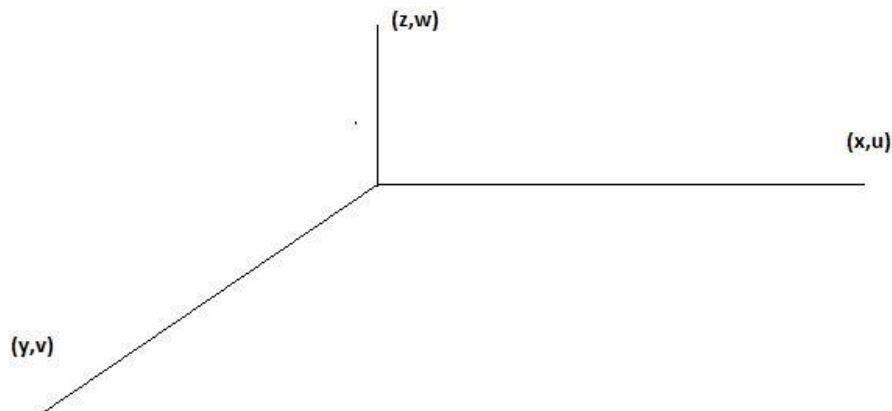
- Cada lámina del laminado se comporta como un material ortótropo.
- Todas trabajan en un estado plano de tensiones ($\sigma_z = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$)
- Los desplazamientos en la lámina son muy pequeños comparados con el espesor del laminado
- Los desplazamientos dentro del plano son funciones lineales de la coordenada en dirección del espesor.

- Los esfuerzos constantes transversales son despreciables y las líneas perpendiculares al plano medio permanecen invariables antes y después de la deformación

Otras hipótesis a tener en cuenta va a ser que la deformación de una lámina va a ser la misma que la del laminado.

Una vez enunciadas estas hipótesis, hay que escribirlas de forma matemática.

Se define el campo de desplazamientos de la siguiente manera



$$\begin{cases} u = u(x, y, z) \\ v = v(x, y, z) \\ w = w(x, y, z) \end{cases}$$

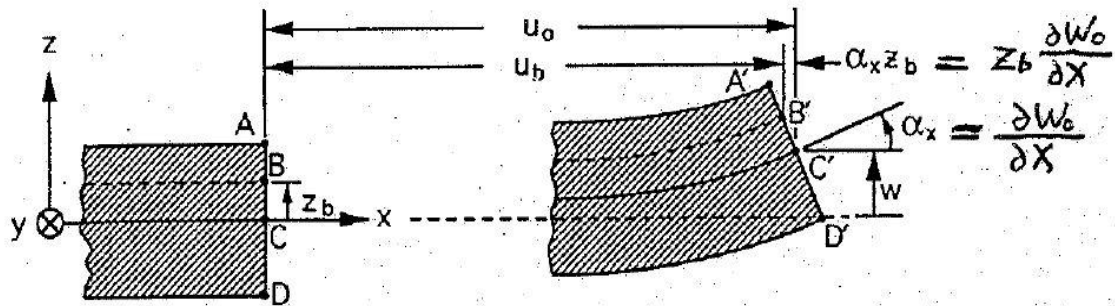
Aplicando las hipótesis de Kirchoff, se trata de demostrar que el desplazamiento en un punto es igual a la suma del desplazamiento del plano medio y un giro hasta el punto deseado.

Siendo u_0 el desplazamiento del punto del eje neutro y u_b el de un punto cualquiera, es posible relacionarlos mediante el ángulo $\alpha_x = \frac{\partial w_0}{\partial x}$

$$u_b = u_0 - z_b \alpha_x$$

$$u_b = u_0 - z_b \frac{\partial w_0}{\partial x}$$

Esto sería análogo para cualquier deformación que ocurriese a lo largo del eje 'y' y para cualquier punto del eje 'z' serían las deformaciones iguales para todos los puntos.



Escribiendo los desplazamientos de un punto en el eje neutro

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u_0}{\partial x} \\ \frac{\partial v_0}{\partial y} \\ \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \end{Bmatrix}$$

Se pueden expresar los de otro cualquiera como función de los que existen en el eje neutro más una curvatura

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix}$$

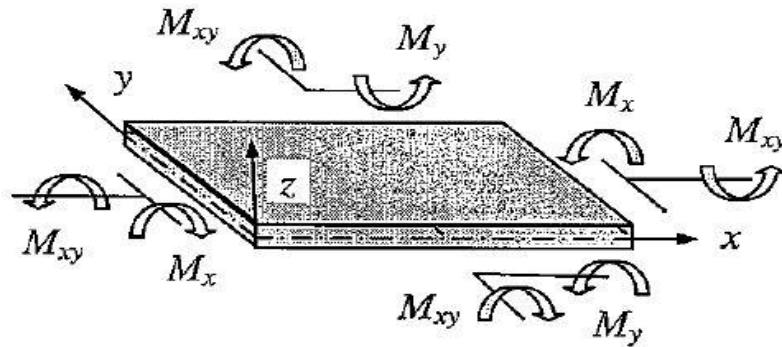
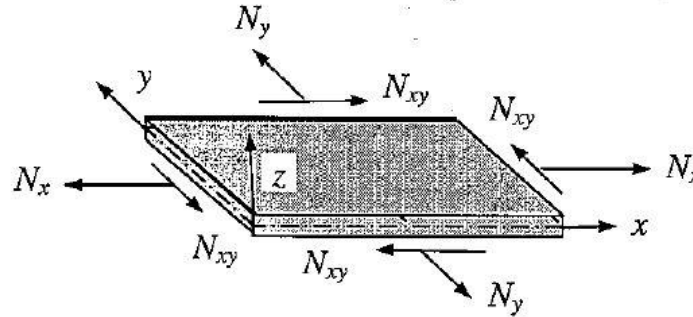
Y siendo el siguiente vector el de las curvaturas

$$\begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ 2 \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix}$$

Para hallar las deformaciones en un laminado se van a sumar las de cada capa, por lo tanto el método visto que relacionaba las tensiones y las deformaciones en una lámina va a ser adaptable a un laminado.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_k = [\bar{Q}] \left[\begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix} \right]$$

Sin embargo, para poder calcular bien una pieza va a ser necesario saber a qué esfuerzos está sometida y de ahí traducirlo a tensiones. Es por esto que se hace necesario relacionar todo lo explicado anteriormente con fuerzas y momentos.



Las fuerzas y los momentos producen tensiones en los materiales, así pues, sumando todas las tensiones existentes se podrán saber las fuerzas resultantes.

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \int_{-t/2}^{t/2} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_k dz = \sum_{k=1}^n \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_k dz$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \int_{-t/2}^{t/2} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_k z dz = \sum_{k=1}^n \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_k z dz$$

Desarrollando las expresiones anteriores

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{21} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \left[\int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} dz + \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix} z dz \right]$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{21} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \left[\int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} z dz + \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix} z^2 dz \right]$$

Una vez resueltas las integrales y volviendo a reagrupar se pueden escribir así las relaciones tensión-deformación del laminado debidas a las fuerzas y los momentos:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix}$$

Y agrupando todo en tan solo una matriz:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix}$$

Siendo

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1})$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3)$$

1.11 CRITERIOS DE FALLO EN LÁMINADOS

Como en cualquier material, es necesario establecer unos criterios para saber cuándo se va a romper. En un material compuesto resulta especialmente interesante porque el hecho de que una lámina falle puede generar problemas al laminado o también puede no pasar nada. Los criterios que se usan para analizar este tipo de materiales no dejan de ser una ampliación de los ya conocidos para los materiales isótropos.

1.11.1 Criterio de máxima tensión principal

Este criterio es igual que en materiales isótropos sólo que aplicado lámina a lámina. Si la descomposición de la tensión en normal y tangencial, en el sentido que sea, resulta que la máxima admisible esta se romperá.

$$\sigma_1 \geq (\sigma_1^T)_{max} \text{ o } \sigma_1 \leq (\sigma_1^C)_{max}$$

$$\sigma_2 \geq (\sigma_2^T)_{max} \text{ o } \sigma_2 \leq (\sigma_2^C)_{max}$$

$$|\tau_{12}| \geq (\tau_{12})_{max}$$

Por el hecho de que las fibras se inclinan un ángulo θ se pueden obtener estos esfuerzos en función del ángulo

$$\sigma_1 = \sigma_x \cos^2(\theta) + \sigma_y \sin^2(\theta) + 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta$$

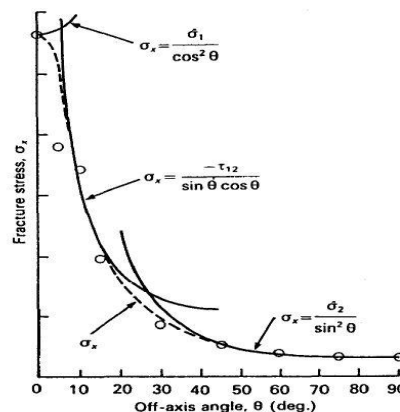
$$\sigma_2 = \sigma_x \sin^2(\theta) + \sigma_y \cos^2(\theta) - 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta$$

$$\tau_{12} = -\sigma_x \sin(\theta) \cos(\theta) + \sigma_y \sin(\theta) \cos(\theta) + \tau_{xy} (\cos^2(\theta) - \sin^2(\theta))$$

Si se supone que $\sigma_y = \tau_{xy} = 0$ se obtiene:

$$\sigma_1 = \sigma_x \cos^2(\theta), \quad \sigma_2 = \sigma_x \sin^2(\theta), \quad \tau_{12} = -\sigma_x \sin(\theta) \cos(\theta)$$

De esta forma si se despeja σ_x de cada una de esas tres ecuaciones se obtienen los posibles casos de fallo. Queda a la vista la gran influencia de una orientación adecuada a la hora de realizar una pieza con estos materiales.



1.11.2 Criterio de Tsai-Wu

Este criterio nace ante los experimentos realizados y los resultados que se van obteniendo. Ello permite ir aproximando cada vez más los cálculos a la realidad. Para una lámina ortótropa sometida a tensión plana

$$f_1\sigma_1 + f_2\sigma_2 + f_6\tau_{12} + f_{11}\sigma_1^2 + f_{22}\sigma_2^2 + f_{66}\tau_{12}^2 + 2f_{12}\sigma_1\sigma_2 \leq 1$$

Los coeficientes f se obtienen mediante diferentes ensayos de tracción, compresión, cortadura y algunos más complicados.

Para tracción y compresión se obtiene:

$$f_1 = \frac{1}{\sigma_{1max}^T} - \frac{1}{\sigma_{1max}^C}, \quad f_{11} = \frac{1}{\sigma_{1max}^T \sigma_{1max}^C}$$

De la misma manera en la dirección 2 se obtiene:

$$f_2 = \frac{1}{\sigma_{2max}^T} - \frac{1}{\sigma_{2max}^C}, \quad f_{22} = \frac{1}{\sigma_{2max}^T \sigma_{2max}^C}$$

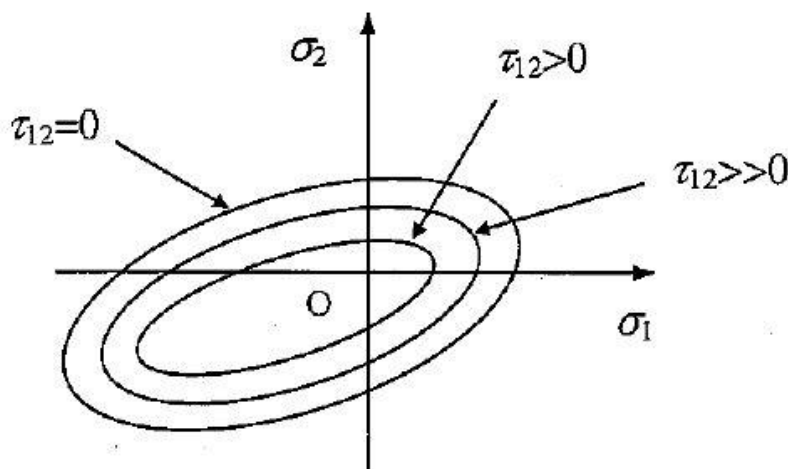
Para cortadura pura:

$$f_{66} = \frac{1}{\tau_{1max}^2}, \quad f_6 = 0$$

Y f_{12} sólo puede hallarse mediante ensayos con tensión biaxial $\sigma_x = \sigma_y = \sigma, \tau_{xy} = 0$.

$$f_{12} = \frac{1}{2\sigma^2} [1 - (f_1 + f_2)\sigma - (f_{11} + f_{22})\sigma^2]$$

A menudo es frecuente representar gráficamente este tipo de ecuaciones para ver con más facilidad qué quieren decir.



1.12 FABRICACIÓN DE COMPOSITES

El secreto de unas buenas propiedades mecánicas en un composite, están estrechamente relacionadas con su proceso de fabricación. Normalmente estos procesos tienen un coste económico mayor que si de otros materiales se tratase. Esto significa que para crear un material compuesto de manera fiable y satisfactoria hay que invertir bastante pero aun así sus excelentes propiedades hacen que estos costes sean asumibles e incluso se puedan obtener beneficios.

Existen diversos métodos para fabricar los composites aunque los más utilizados hoy en día son dos: 'Wet lay-up' y 'Prepregs o Preimpregnados'.

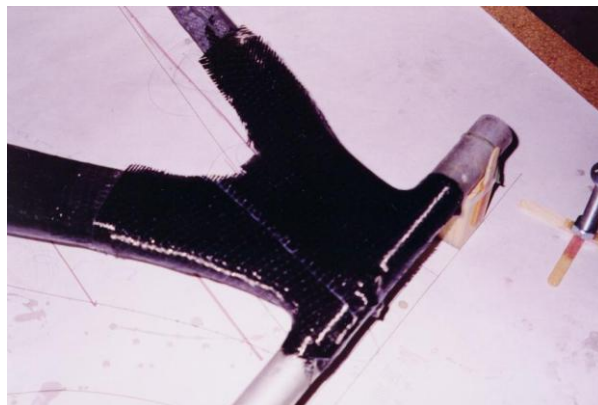
El primer método tiene un coste más pequeño que el segundo y su proceso solo conlleva un paso. El segundo, además de ser más caro, requiere unos procesos de fabricación laboriosos, utilizando curado en autoclaves bajo condiciones de presión y temperatura controladas.

1.12.1 Wet lay-up

La traducción más exacta sería apilación de capas en mojado. Este método de fabricación consiste en ir poniendo sobre un molde una combinación de capas y resina hasta obtener el número deseado. Se trata de un proceso manual y muy versátil ya que con los medios actuales es muy fácil crear un molde. Una vez se ha terminado de poner capas sobre el molde puede dejarse secar al aire libre simplemente o curarlo en una bolsa de vacío.

Como ya se ha dicho, el coste de este tipo de fabricación es bajo frente a otros y no hacen falta grandes conocimientos ni material de trabajo sofisticado para crear una pieza. Se debe tener cuidado a la hora de mezclar las resinas y tomar las precauciones adecuadas con una mascarilla para no intoxicarse debido a la volatilidad de estas y al poner los trozos de fibras para que su orientación sea la adecuada. Una vez se ha secado el molde no hay más que cortar los trozos sobrantes y pulir los bordes con una lijadora.

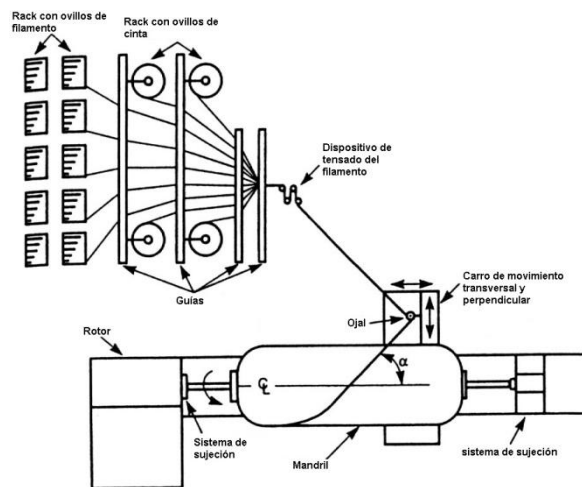
Este método, es válido para la fabricación del cuadro en este proyecto. Realizando moldes en las zonas en las que los tubos se juntan, como el tubo de dirección o la caja del pedalier, se pueden empalmar los tubos simplemente con resina.



1.12.2 Bobinado

Este método consiste enrollar una serie de hilos ya mojados en resina alrededor de un mandril. La clave de este proceso es la velocidad relativa entre el giro del mandril y el carro por el que pasan las fibras para agruparse. Si es muy alta, el ángulo del composite será más grande. Este proceso es muy común para la fabricación de tuberías y farolas.

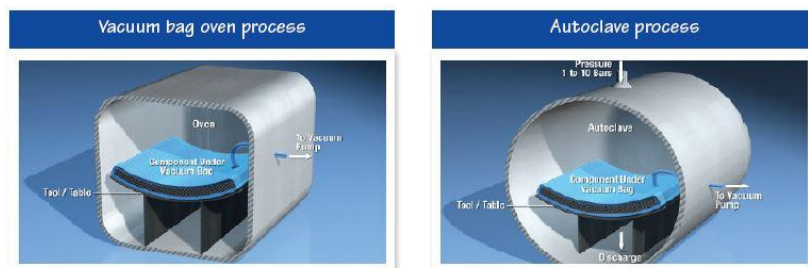
Una vez se ha terminado de enrollar las capas deseadas, se aplica vapor dentro del mandril para sacar el molde y poder curarlo en un autoclave. Se pueden doblar posteriormente volviendo a calentar localmente la pieza y crear así la geometría final deseada.



En la imagen se puede apreciar cómo es este proceso y los parámetros en los cuales está reflejada la velocidad del carro y del mandril.

1.12.3 Prepregs

Son tejidos unidireccionales que vienen de fábrica preimpregnados con resina para no tener que aplicarlas de forma manual posteriormente. De esta forma, las proporciones son perfectas y se gana en calidad y resistencia final. Vienen protegidos por un plástico para que la resina no se estropee y las condiciones en las que hay que conservarlos son algo especiales. Una vez puestos sobre el molde con las orientaciones deseadas, se puede curar en un autoclave o haciendo el vacío simplemente y aplicando calor. Según el proceso que se escoja las propiedades finales variarán.



1.12.4 Pultrusión

Este proceso sirve para crear perfiles de una forma determinada. Se parte de una cantidad de hilos, los cuales se impregnan en resina y se les hace pasar por una máquina que les da la forma y cura el composite. Al final hay unos carros que tiran de los perfiles y los van sacando hasta una cuchilla especial que los corta con la longitud deseada.

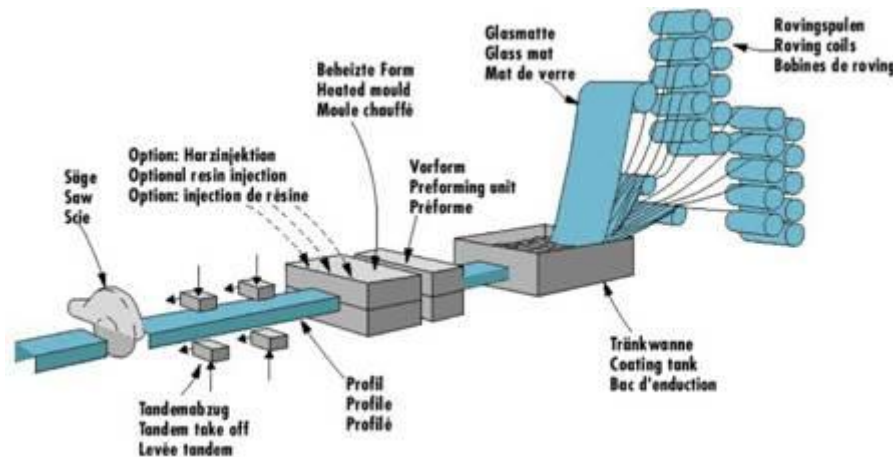


Fig. 5: Standard version of horizontal pultrusion

1.12.5 Método elegido para la fabricación del cuadro

Para la fabricación de la bicicleta serían válidos tanto el método wet lay-up como el de los preimpregnados. Tras valorar ambas opciones, se ha decidido elegir el wet lay up porque:

- **Menor precio de fabricación:** Este método requiere menos costes porque el material es más barato sin el tratamiento de preimpregnado de fábrica.
- **Calidad final:** Aunque la calidad de los preimpregnados y su resistencia es algo mayor, los cuadros de bici pueden resistir perfectamente las solicitaciones si se fabrican mediante el método wet lay-up. La mezcla de las resinas manual y la colocación de las fibras van a seguir siendo importantes aunque por pequeñas imprecisiones a la hora de tener más trozos con los que trabajar no van a suponer problemas posteriores.

1.12.6 Proceso de fabricación de los cuadros

Existen múltiples formas de fabricar los cuadros en carbono hoy en día. Esta tecnología ha sufrido una gran evolución durante los años y se han optimizado los procesos de fabricación.

A pesar de ello, un factor común es la utilización de moldes para crear las uniones de tubos o el cuadro entero. Para este caso, se va a utilizar la creación de moldes parciales y un ensamblaje final.

- **Creación de los moldes donde se juntarán varios tubos:** caja del pedalier, barra de dirección y unión de las vainas.
 En esta fotografía se puede apreciar un molde de la caja del pedalier:



En este molde, se crea una pieza de cera para poder envolverla con la fibra. Una vez puesta las capas con la resina se cierra el molde y se le aplica presión y temperatura hasta que la pieza está preparada. Esos valores de presión y temperatura son aplicados por cada fabricante de forma distinta y a su gusto.

- **Creación y unión de los tubos:** Los tubos se fabrican de forma similar y una vez están preparados, no hay más que juntarlos en las uniones con resina. Tras este paso, se vuelve a introducir en el autoclave la pieza para que se seque bien la resina.
- **Pulido, pintado y montaje de las partes mecánicas:** El cuadro ya está listo para poder aplicarle tratamientos superficiales de pintura o barniz y montarle las partes mecánicas.

1.13 SELECCIÓN DE MATERIALES

Existen multitud de fabricantes de materiales compuestos y más concretamente de fibra de carbono: Toray, Hexcel, Zoltek... son algunos de los más conocidos. Estas empresas se dedican a la fabricación de tejidos, bobinados, preregs, etc.

Debido al secretismo que rodea a sus productos si se intentan obtener de forma gratuita sus propiedades, es muy difícil encontrar en internet dichos datos. Es obvio que un producto tan exclusivo y que tiene cada uno sus métodos de fabricación se proteja del espionaje industrial.

Aún así, tras consultar con gente que trabaja con estos materiales, pude acceder a los datos de los siguientes materiales:

	Fibra de carbono	Fibra de vidrio
E1(MPa)	130000	25000
E2(MPa)	9000	25000
E3(MPa)	9000	10289
G12(MPa)	4000	4260
G23(MPa)	2800	3429
G13(MPa)	4000	3429
ν_{12}	0.2	0.1337
ν_{23}	0.525	0.3222
ν_{31}	0.02	0.1337
Densidad Kg/m^3	1750	2500

Los datos de las fuerzas tensiones que aguanta cada material son los siguientes:

	Fibra de carbono	Fibra de vidrio
Tensión máxima de tracción en X (MPa)	1500	850
Tensión máxima de compresión en X (MPa)	1000	600
Tensión máxima de tracción en Y (MPa)	50	60
Tensión máxima de compresión en Y (MPa)	80	60
Tensión máxima de tracción en Z (MPa)	50	60
Tensión máxima de compresión en Z (MPa)	80	60
Cortadura XY (MPa)	70	65
Cortadura YZ (MPa)	60	65
Cortadura ZX (MPa)	60	65

Por su mayor resistencia en la dirección X tanto a tensión como a compresión y ya que otras direcciones funcionan más o menos igual, el material elegido es la fibra de carbono. El factor que también me ayuda a escogerla es su menor densidad ya que cuanto menos pese el cuadro, mejor para el ciclista.

1.14 CONCLUSIÓN FINAL DEL PROYECTO

Una vez acabado el proyecto, puedo afirmar que he conseguido cumplir los objetivos planteados de forma satisfactoria. He aprendido a manejar Catia y ser capaz de realizar cualquier diseño que haya que resolver y además también he adquirido competencias a la hora de manejar un programa de simulación por elementos finitos. A día de hoy es un paso importante en las habilidades de un ingeniero y puede servir de llave para obtener un puesto de trabajo en estos tiempos difíciles que el país atraviesa.

Otro de los objetivos marcados como muy importantes era el de introducirse en el mundo de los materiales compuestos. También puedo decir que se ha cumplido y que con los conocimientos obtenidos, se abre la puerta de un campo nuevo en el que poder trabajar en el futuro. No sólo en la creación de bicicletas sino en cualquier pieza en la que se pueda utilizar un material de este tipo.

En líneas generales la realización del proyecto ha sido un periodo diferente al resto de los vividos durante la carrera por el hecho de haber investigado por mi cuenta y por haber tenido que indagar en bibliotecas, algo no muy frecuente debido a la gran influencia de Internet hoy en día.

He disfrutado mucho con la realización del proyecto y me ha ayudado a crecer como persona en el aspecto de elaborar algo desde cero. Hasta ahora a pesar de haber estado aprendiendo conocimientos nuevos durante los años de la carrera, no había tenido que buscarlos y elegir cuáles eran los necesarios. Este proceso me ha hecho aprender a valorar la información y a utilizarla de forma correcta ya que a veces no toda es necesaria.

1.15 RESUMEN DEL PRESUPUESTO

PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL			
PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL			
Nº		CAPÍTULO	IMPORTE (€)
1		MATERIALES	529,01
2		ACCESORIOS	7.149,42
3		ENSAYOS MECÁNICOS	800,00
Presupuesto de ejecución material			8.478,43
		13,00% Gastos generales	1.102,20
		6,00% Beneficio industrial	508,71
		SUMA DE G.G. y B.I.	1.610,90
		21,00% I.V.A.	1.780,47
		TOTAL PRESUPUESTO GENERAL	11.869,80
		Asciende el Presupuesto de ejecución material a la expresada cantidad de ONCE MIL OCHOCIENTOS SESENTA Y NUEVE EUROS Y OCHENTA CÉNTIMOS	

1.16 BIBLIOGRAFÍA PROYECTO FIN DE CARRERA

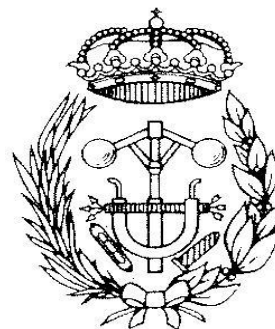
1.15.1 Libros y apuntes

- 'Diseño y análisis de materiales compuestos' Stephen w, Tsai. Antonio Miravete. Editorial reverté.
- 'Materiales compuestos Volumen 1' Antonio Miravete. Editorial Reverté.
- 'Principles of composite materials and structures' Dr Gang Zhou.
- 'Materiales compuestos' TECNUM San Sebastián.
- 'Bicicleta con pedales de movimiento rectilíneo'. I. Zabalza, J. Ros, J.J. Gil, J.M. Pintor, y J.M. Jiménez

1.15.2 Páginas web

- www.canyon.com
- www.cannondale.com
- www.comunidadciclismo.com
- www.tohotenax.com
- www.sglgroup.com
- www.todomountainbike.com

Pamplona, a 17 de Febrero de 2014
Alberto Solana Rodríguez
Ingeniero Técnico Industrial Mecánico



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación :

INGENIERO TÉCNICO INDUSTRIAL MECÁNICO

Título del proyecto:

CUADRO DE BICICLETA EN MATERIAL COMPUESTO

DOCUMENTO N°2 CÁLCULOS

Alberto Solana Rodríguez

Vanesa Estremera Carrera

Pamplona, 17 de Febrero de 2014

ÍNDICE

CÁLCULOS

2.1 INTRODUCCIÓN.....	4
2.2 CÁLCULO DE LAS Q DE LOS MATERIALES	5
2.2.1 Fibra de carbono.....	5
2.2.2 Fibra de vidrio	9
2.2.3 Conclusiones	13
2.3 CÁLCULO DE LA CADENA.....	14
2.3.1 Desarrollo elegido	14
2.3.2 Aclaraciones previas	14
2.3.3 Cadena.....	15
2.3.4 Cálculo	16
2.3.5 Conclusión y decisión final	20
2.4 FUERZAS SOBRE EL CUADRO	21
2.4.1 Restricciones del cuadro.....	21
2.4.2 Deducción de las fuerzas que actúan sobre el cuadro	22
2.4.2.1 Fuerzas sobre la caja del pedalier.....	22
2.4.2.2 Fuerzas sobre las vainas traseras.....	26
2.4.3 Casuística de situaciones	27
2.4.3.1 Caso 1: Ritmo suave.....	27
2.4.3.2 Caso 2: Sprint.....	31
2.5 ANÁLISIS Y CÁLCULOS DE LAS DISTINTAS COMBINACIONES CON MATERIAL COMPUESTO PARA EL CUADRO	35
2.5.1 Criterios de análisis	35
2.5.2 Cumplimiento de los criterios de fallo	35
2.5.3 Caso de carga 1:	35

2.5.3.1 Bases para la simulación	36
2.5.3.2 Espesor de los tubos inicial	36
2.5.3.3 Estudio 1.....	37
2.5.3.4 Estudio 2.....	41
2.5.3.5 Estudio 3.....	44
2.5.3.6 Conclusiones del caso de carga 1	47
2.5.4 Caso de carga 2	47
2.5.4.1 Espesor de los tubos inicial	48
2.5.4.2 Estudio 4.....	48
2.5.4.3 Estudio 5.....	49
2.5.4.4 SOLUCION FINAL	54
2.5.5 Conclusiones de los análisis	58
 2.6 RESULTADO FINAL Y SOLUCION ELEGIDA	 59

2.1 INTRODUCCIÓN

Para realizar los cálculos que justifica el proyecto, se han empleado varias herramientas. Por un lado se han realizado algunos a mano y con tablas de doble entrada, para otros se ha utilizado una hoja de cálculo Excel y para los más potentes y complicados, como es el caso de la resistencia del cuadro, se ha empleado el programa Marc-Mentat.

Marc-Mentat es un software de MSC , empresa que lleva 50 años elaborando programas para simular cálculos estructurales. Este programa ofrece la posibilidad de llevar a cabo cualquier simulación, con una amplia gama de materiales, con exactitud y de manera sencilla.

Como ya se ha dicho, Marc no sólo realiza cálculos estructurales sino que también entra en el campo de la transmisión del calor, fluidos, electricidad, etc..

Para el resto de cálculos, se han utilizado hojas excel y apuntes de alguna asignatura de la carrera.

2.2 CÁLCULO DE LAS Q DE LOS MATERIALES

Como ya se ha explicado anteriormente, la importancia y el interés de los materiales compuestos se halla en sus propiedades variantes según la orientación de las fibras. Los valores obtenidos, son para una mezcla con una cantidad específica de resina epoxi, no revelada por el fabricante y son los siguientes:

2.2.1 Fibra de carbono

E1 (MPa)	E2 (MPa)	E3 (MPa)	G12 (Mpa)	G23 (MPa)	G31 (MPa)	ν_{12}	ν_{23}	ν_{31}
130000	9000	9000	4000	2800	4000	0.2	0.525	0.02

Densidad: $2500 \frac{Kg}{m^3}$

Estos valores permiten hallar la matriz de rigidez reducida cuyos valores están explicados en la memoria:

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = 130361 \text{ MPa} \quad Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = 9025 \text{ MPa}$$

$$Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = 1805 \text{ MPa} \quad Q_{21} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = 1805 \text{ MPa}$$

$$Q_{66} = G_{12} = 4000 \text{ MPa}$$

$$[Q] = \begin{bmatrix} 130361 & 1805 & 0 \\ 1805 & 9025 & 0 \\ 0 & 0 & 4000 \end{bmatrix} \text{ MPa}$$

Análogamente, para un ángulo θ cualquiera, las ecuaciones para hallar los valores de Q son las siguientes:

$$\overline{Q}_{11} = Q_{11} \cos^4 \theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{22} \sin^4 \theta$$

$$\overline{Q}_{12} = (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{12}(\sin^4 \theta + \cos^4 \theta)$$

$$\overline{Q}_{22} = Q_{11} \sin^4 \theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{22} \cos^4 \theta$$

$$\overline{Q}_{16} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta$$

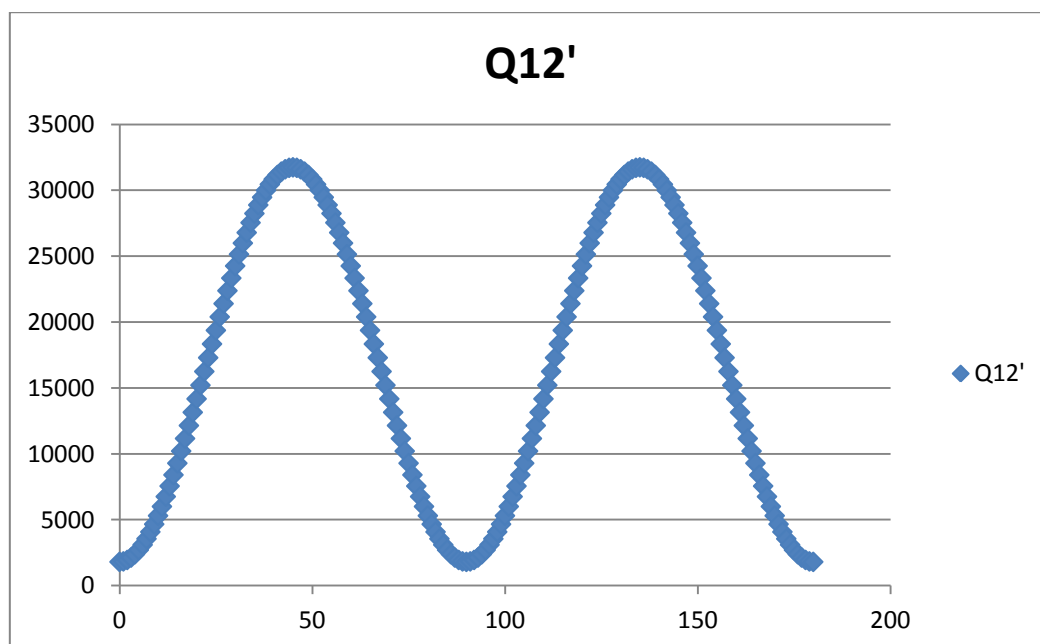
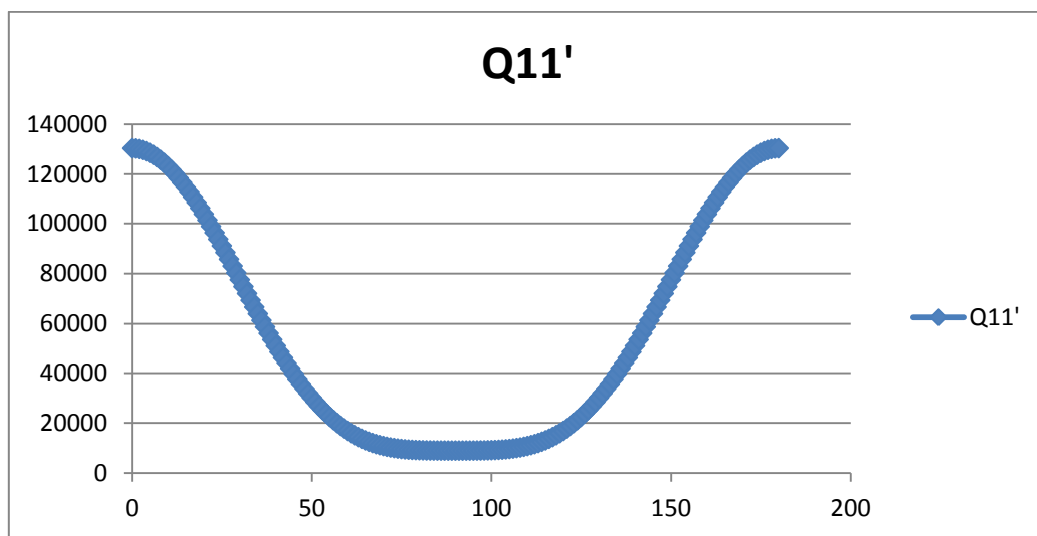
$$\overline{Q}_{26} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta$$

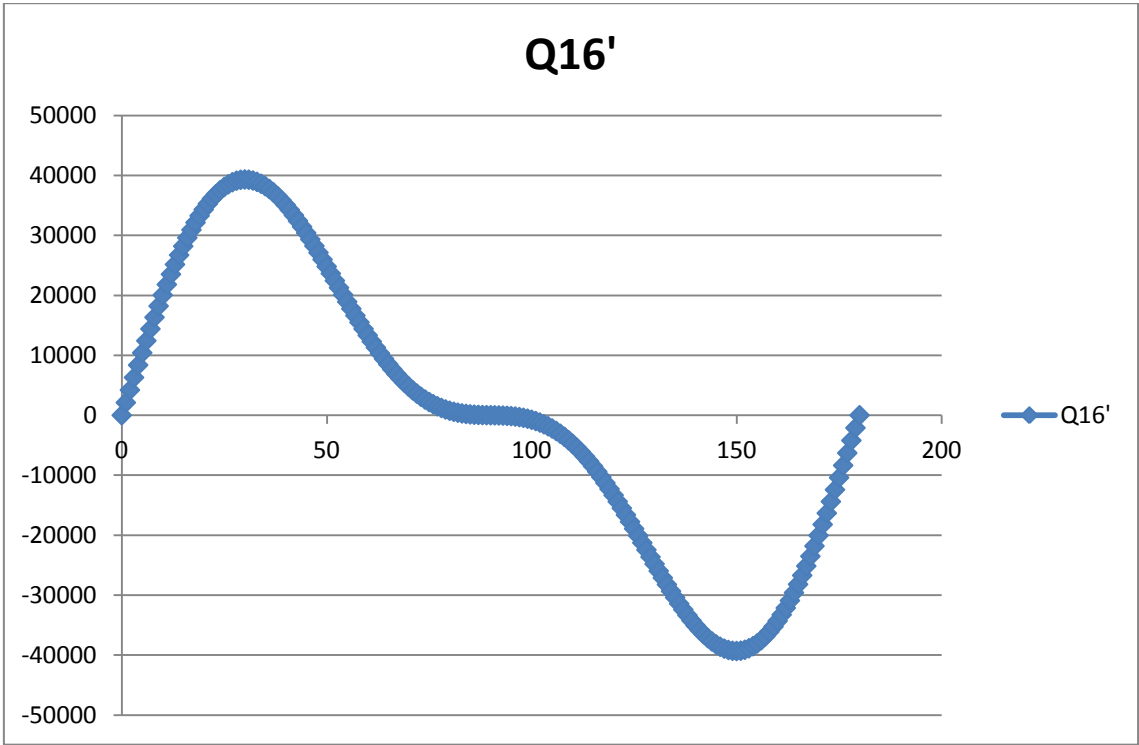
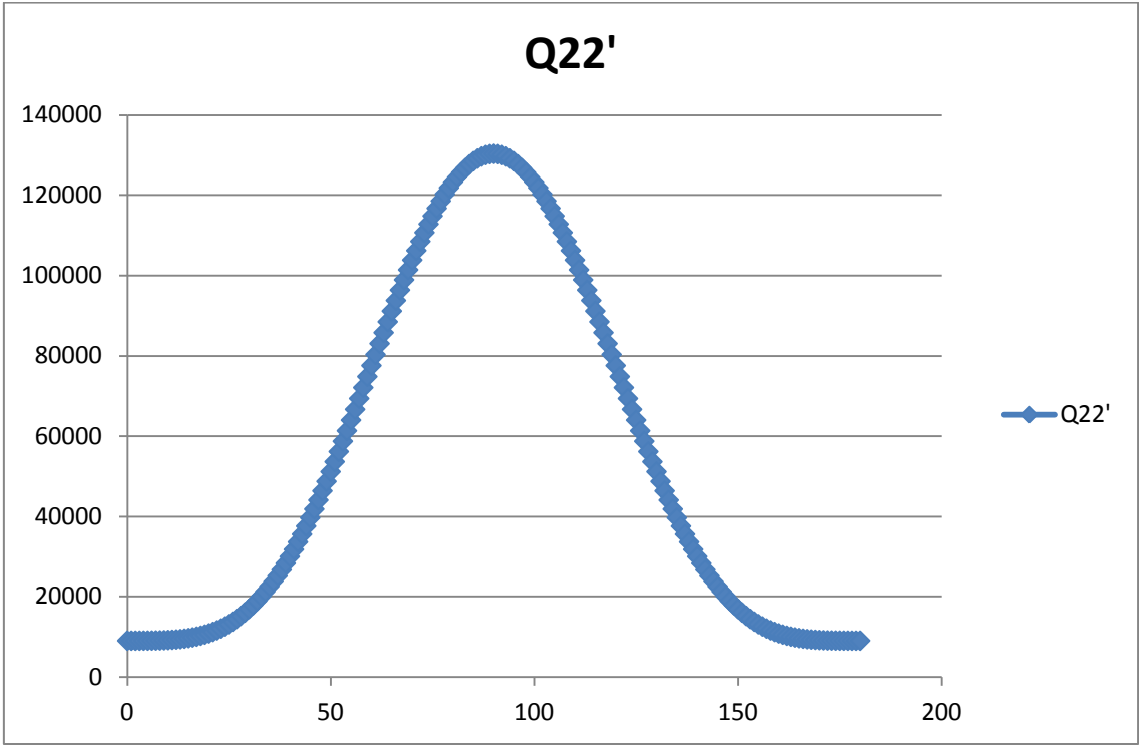
$$\overline{Q}_{66} = (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{66}(\sin^4 \theta + \cos^4 \theta)$$

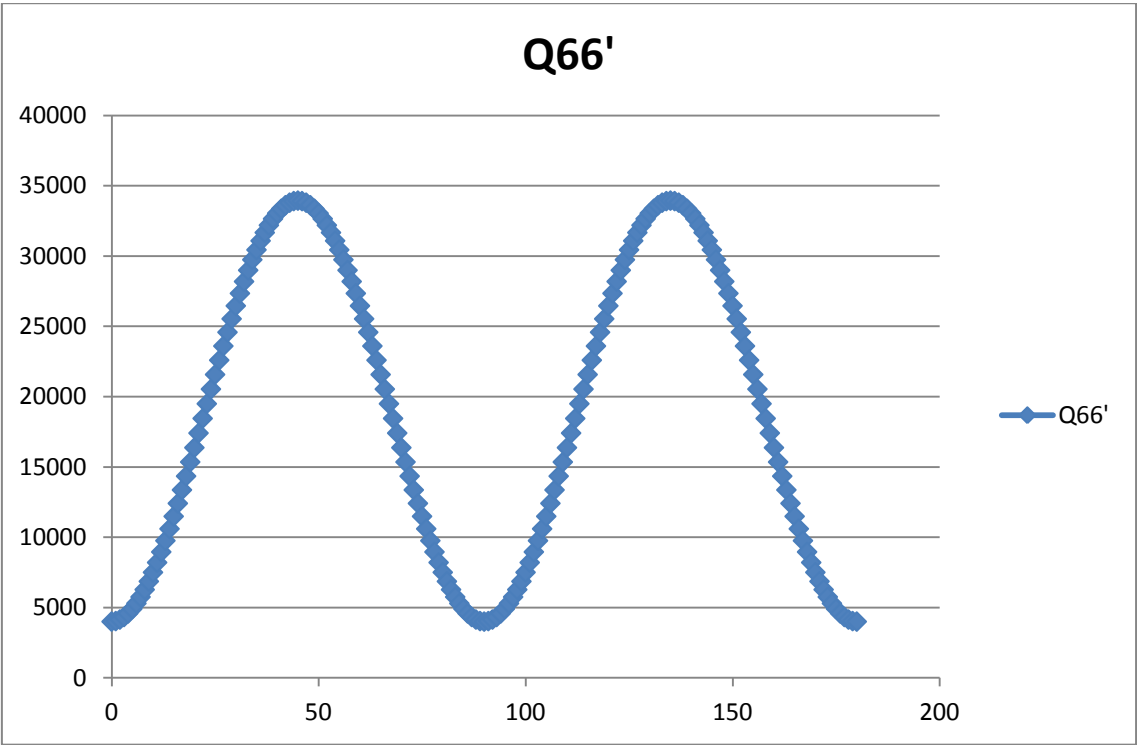
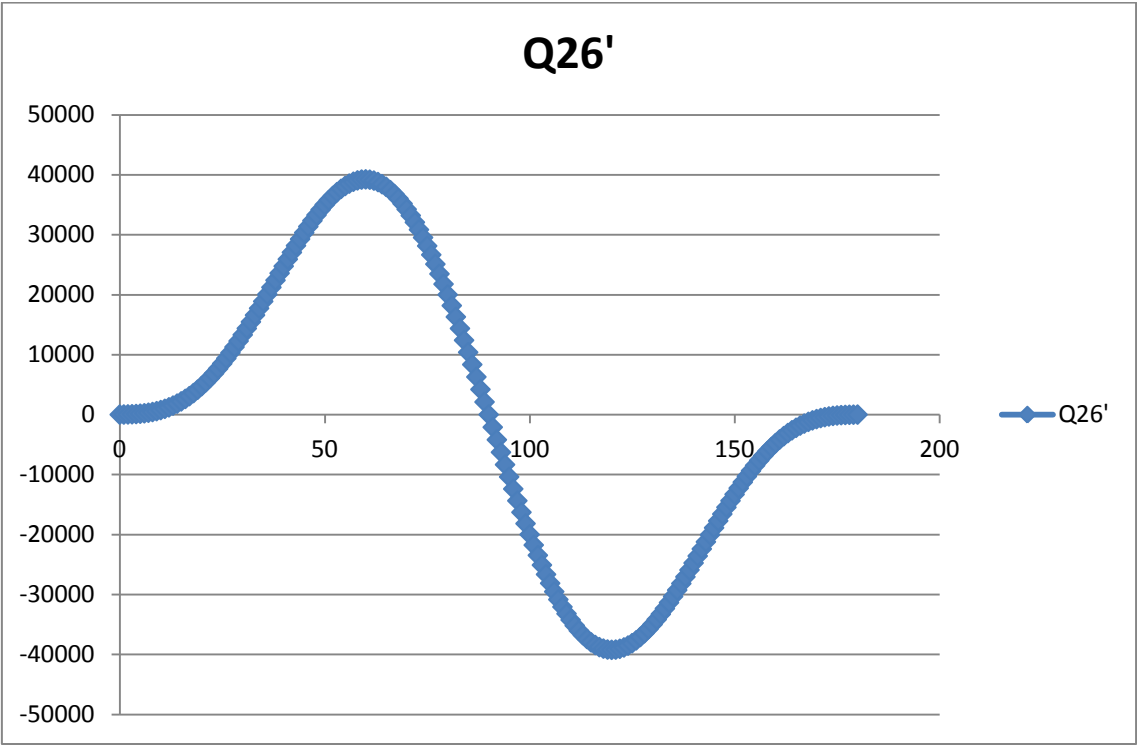
Que aplicados para 0°, 45°, 90°, 135° y 180° resultan los siguientes valores:

Grados/MPa	\overline{Q}_{11}	\overline{Q}_{12}	\overline{Q}_{22}	\overline{Q}_{16}	\overline{Q}_{26}	\overline{Q}_{66}
0	130361	1805	9025	0	0	4000
45	39749	31749	39749	30334	30334	33944
90	9025	1805	130361	0	0	4000
135	39749	31749	39749	-30334	-30334	33944
180	130361	1805	9025	0	0	4000

Para ver estos cambios con mayor claridad, se van a representar gráficamente las ecuaciones de 0 a 180 grados.







Ahora se puede ver a simple vista por dónde están los valores máximos y mínimos de la matriz de rigidez. Gracias a esta información, va a ser más fácil contrarrestar de forma efectiva los esfuerzos en algún punto crítico que surja a la hora de calcular el cuadro.

Tabla de valores máximos y mínimos

	$\overline{Q_{11}}$	$\overline{Q_{12}}$	$\overline{Q_{22}}$	$\overline{Q_{16}}$	$\overline{Q_{26}}$	$\overline{Q_{66}}$
Q_{\max} (MPa)	130361	31749	130361	39323	39236	33944
Ángulo (grados)	0,180	45,135	90	30,150	60,120	45,135
Q_{\min} (MPa)	9025	1805	9025	0	0	4000
Ángulo (grados)	90	0,90,180	0,180	0.90,180	0.180	0,90,180

2.2.2 Fibra de vidrio

Las propiedades de este material difieren con las de la fibra de carbono y aunque algunas sean menores, también se pueden realizar una gran gama de productos.

E1 (MPa)	E2 (MPa)	E3 (MPa)	G12 (Mpa)	G23 (MPa)	G31 (MPa)	ν_{12}	ν_{23}	ν_{31}
25000	25000	10289	4260	3429	3429	0.1337	0.3222	0.1337

Densidad: $1750 \frac{Kg}{m^3}$

A simple vista el hecho que E1 y E2 sean iguales, significa que ν_{12} y ν_{21} también lo van a ser por lo que no solo Q_{12} y Q_{21} van a tener el mismo valor sino que además Q_{11} y Q_{22} también.

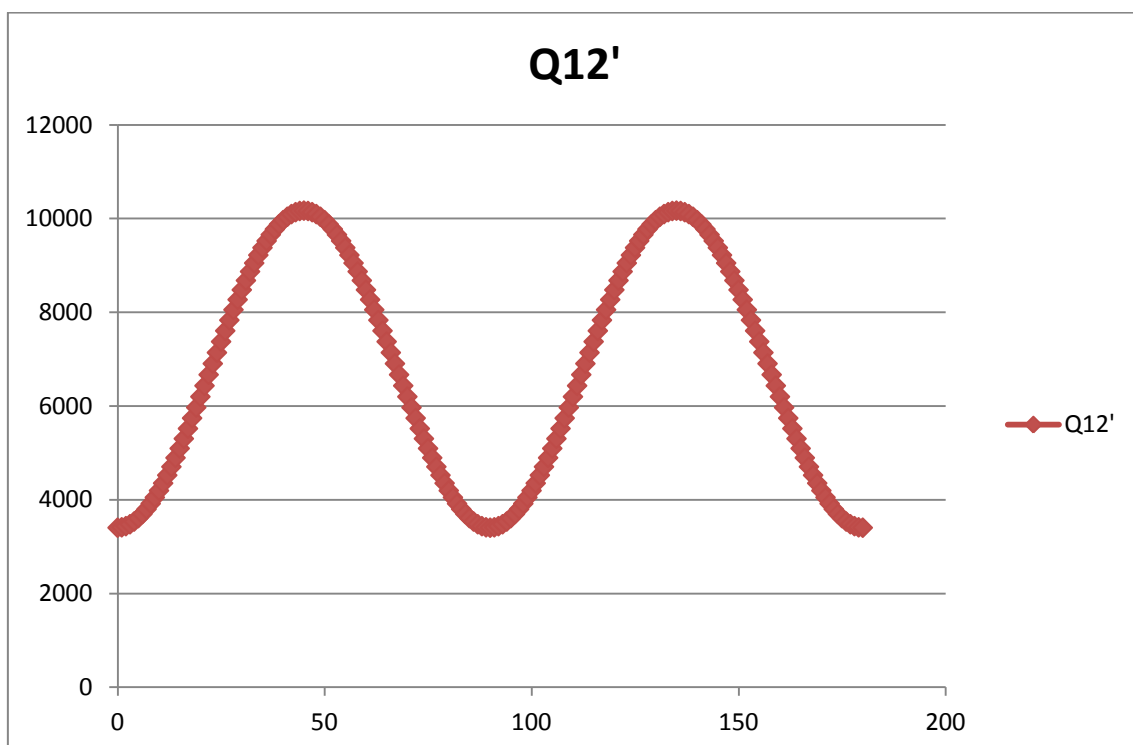
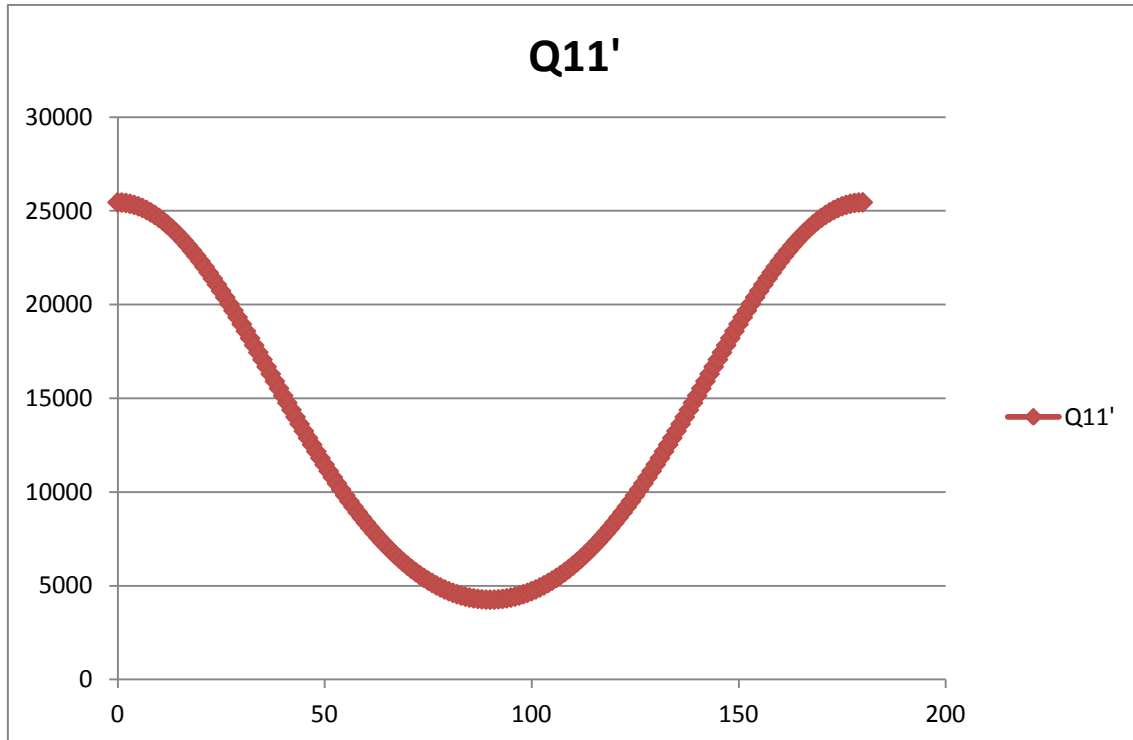
$$[Q] = \begin{bmatrix} 25455 & 3403 & 0 \\ 3403 & 25455 & 0 \\ 0 & 0 & 4260 \end{bmatrix} MPa$$

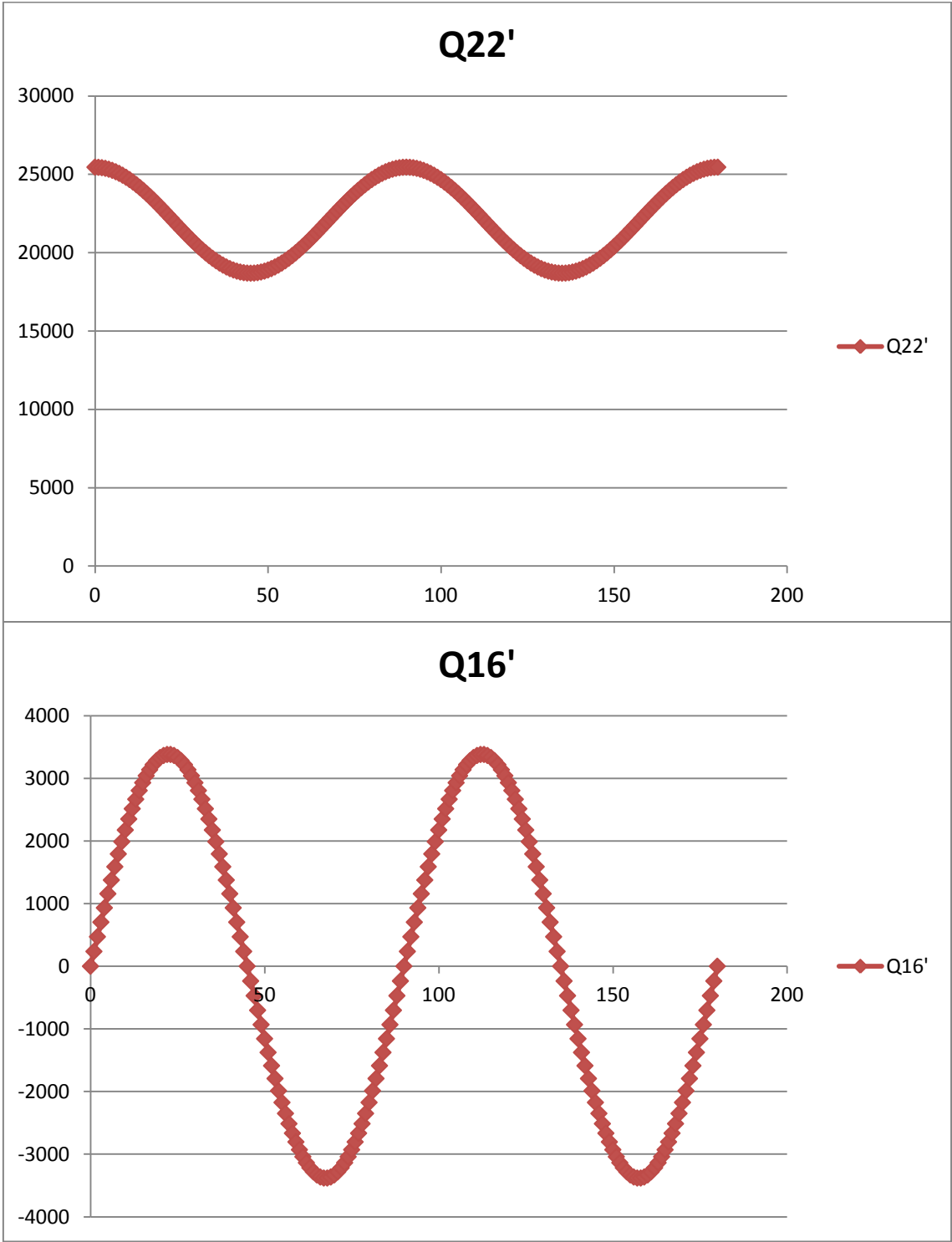
Los valores de los ángulos más significativos son los reflejados en la siguiente tabla:

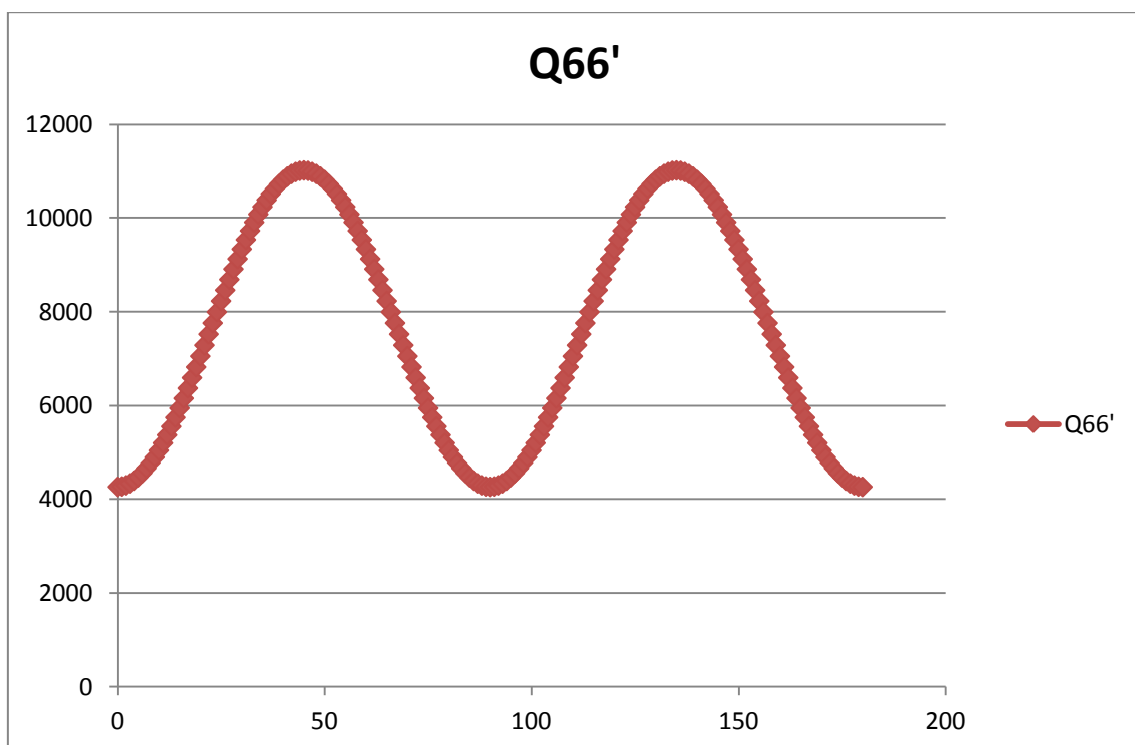
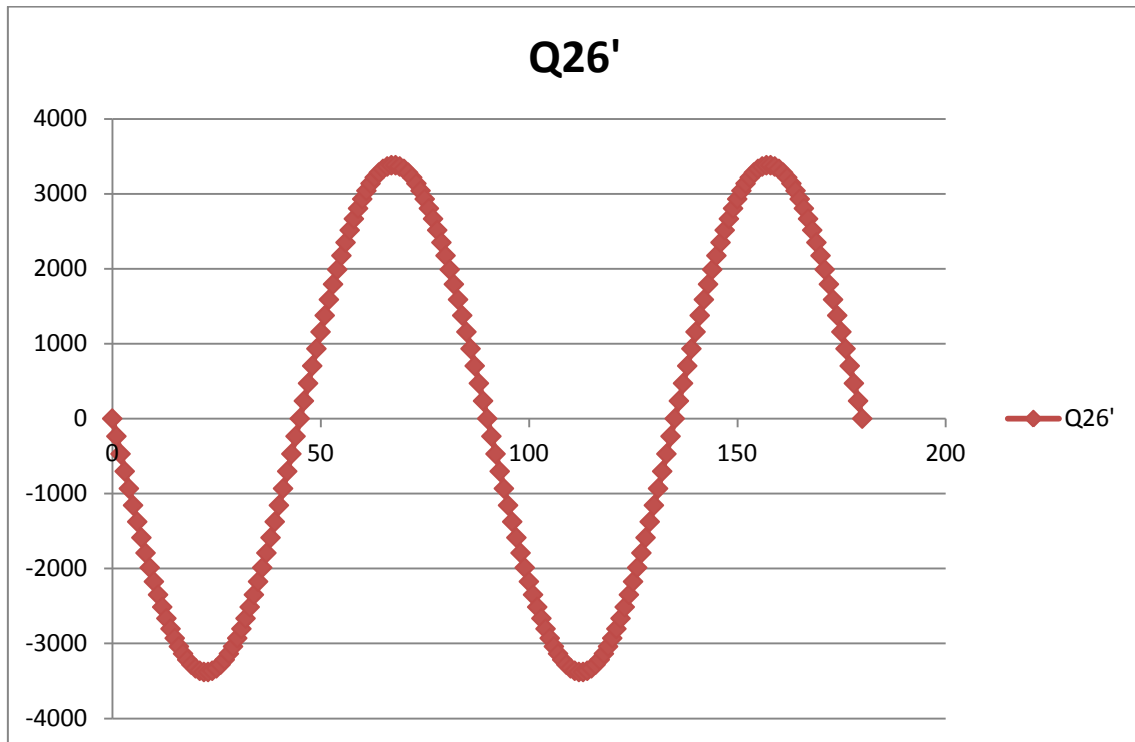
Grados/MPa	$\overline{Q_{11}}$	$\overline{Q_{12}}$	$\overline{Q_{22}}$	$\overline{Q_{16}}$	$\overline{Q_{26}}$	$\overline{Q_{66}}$
0	25455	3403	25455	0	0	4260
45	13255.25	10169	15708.25	0	0	11026
90	4260	3403	25455	0	0	4260
135	13255.25	10169	15708.25	0	0	11026
180	25455	3403	25455	0	0	4260

Este material parece más simétrico y aunque Q_{11} y Q_{22} son iguales a 0° , al variar la orientación se aprecian los cambios.

Las gráficas de las curvas de la variación de las Q son las siguientes:







En la siguiente tabla se pueden ver los valores máximos y mínimos de cada Q:

	$\overline{Q_{11}}$	$\overline{Q_{12}}$	$\overline{Q_{22}}$	$\overline{Q_{16}}$	$\overline{Q_{26}}$	$\overline{Q_{66}}$
Q _{max} (MPa)	25455	10169	25455	3380.94	3380.94	11026
Ángulo (grados)	0,180	45,135	0,90,180	22,112	67,157	45,135
Q _{min} (MPa)	4260	3403	18689	-3380.94	-3380.94	4260
Ángulo (grados)	90	0,90,180	45,135	67,157	22,112	0,90,180

2.2.3 Conclusiones

Si se comparan las gráficas de ambos materiales, Q11, Q12 y Q66 poseen la misma forma en la fibra de carbono y en la de vidrio.

En el caso de Q22, la fibra de carbono tiene una gráfica en la que se parte de un mínimo, se alcanza un máximo a 90 grados y vuelve a disminuir hasta el mismo valor mínimo al llegar a 180 grados. Sin embargo, cuando se representa Q22 para la fibra de vidrio, este parámetro empieza en un valor máximo para 0 grado, disminuye hasta los 45 grados alcanzando el mínimo y vuelve a crecer hasta los 90 grado. Así otra vez desde 90 a 180 grados. Esto se debe a que al desarrollar ambas fórmulas, la de la fibra de vidrio queda en forma $X(\sin^4\theta + \cos^4\theta) + Y(\sin^2\theta\cos^2\theta)$ y la de carbono queda $X(\sin^4\theta + \cos^4\theta) + Y(\sin^2\theta\cos^2\theta) + Z\cos^4\theta$. Ese termino de más es el causante de la diferencia entre ambas gráficas. En la fibra de vidrio no existe gracias a que Q11 y Q22 son iguales mientras que en el carbono no ocurre.

Al analizar las gráficas de Q16 y Q26, se observa que vuelve a ser diferente el comportamiento entre ambos materiales. Esto es debido a que como las funciones trigonométricas están elevadas a exponentes impares en la fórmula para obtener estos parámetros, y también influye la resta de las Q iniciales de los materiales, pueden variar los signos y los resultados ya que en la fibra de carbono no se da la igualdad entre Q11 y Q22. Es curioso el hecho de que en la fibra de vidrio estas gráficas son iguales solo que con un desfase de 90 grados y en la de carbono ni siquiera presentan esa igualdad.

Es muy importante resaltar la utilidad de las gráficas para cualquier aspecto que pueda ser parametrizado. Gracias a ellas, a simple vista se deducen las orientaciones más fuertes y se puede aprovechar para mejorar el diseño de cualquier pieza hecha en estos materiales sin necesidad de realizar experimentos a ciegas a la hora de introducir los datos en el ordenador.

2.3 CÁLCULO DE LA CADENA

No solo en la bici es importante que resista el cuadro. También es necesario que el esfuerzo del ciclista se transmita de forma correcta. Para ello se utiliza la cadena. Este mecanismo parece simple pero tiene que ser diseñado con el mismo cuidado o más que el resto del cuadro.

La cadena se encarga de transmitir la potencia que ejerce el ciclista sobre el plato a los piñones traseros. El sistema de cambio de una bicicleta además posee un cambio de marcha que da la posibilidad de variar los desarrollos para que se adapten al terreno y la pendiente en todo momento. Estos desarrollos son ajustables y simplemente varían el número de dientes de cada plato y piñón hasta obtener una configuración que permita pedalear con cadencia en cualquier circunstancia.

Existe la posibilidad de llevar un número de piñones en el cassette que varía desde 9 a 11. Esto influye en el tipo de cadena aunque en este cálculo no se va a tener en cuenta.

Para calcular las cadenas, se siguen una serie de pasos predeterminados por el fabricante que conducen a indicar la cadena correcta en una tabla de doble entrada. Todas las cadenas están sujetas a normativas y por ello su fabricación y sus tamaños están normalizados.

2.3.1 Desarrollo elegido

Por ser una bicicleta de carretera, el desarrollo que se va a montar permitirá rodar en llano a una velocidad alta así como superar puertos con una pendiente moderada.

- Platos Shimano Dura Ace FC-9000 50-34T
- Cassete Shimano Dura Ace CS-7700 9 speed 11-23T

2.3.2 Aclaraciones previas

Por el hecho de tener varios piñones y platos, la longitud de la cadena varía según la configuración en ese momento. Para solucionar ese problema y que la cadena siempre esté tensa, se utiliza el cambio de marcha. Este mecanismo se adapta y tensa la cadena en cualquier situación. Para conocer la longitud de cadena que se pone, he consultado páginas de mecánicos y he hallado dos métodos: uno analítico y otro práctico.

- $$L = \left((2(C) \times 0,39) + \left(\frac{D}{4} + \frac{T}{4} + 1 \right) \right) \times 2,54$$

Siendo C la longitud entre ejes en cm, D el número de dientes del plato más grande y T el de dientes del piñón mayor.

- Colocando la cadena entre el plato más grande y el piñón más grande sin pasar por el cambio. A esa distancia se le suma un eslabón más.

Aunque sea posible engranar algunas configuraciones, no siempre va a ser beneficioso para el mecanismo. Por ejemplo, el utilizar el plato grande con el piñón más grande hace que la cadena esté cruzada y su funcionamiento dañe los mecanismos y la propia cadena.

Para que la cadena tenga una vida útil más larga, se ha de procurar cumplir las siguientes condiciones:

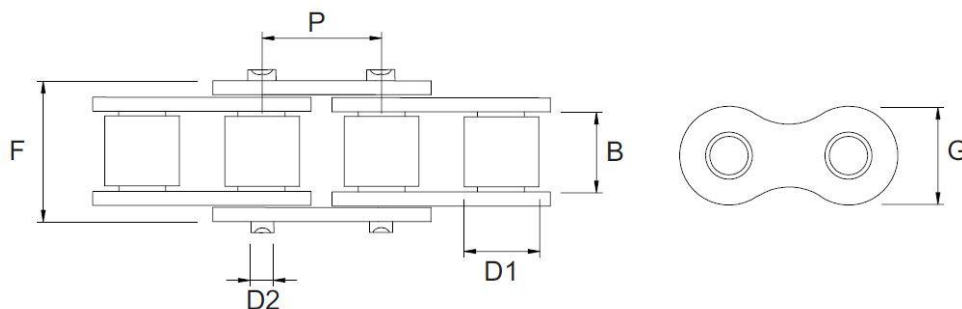
- Alineamiento de las ruedas por las que pasa la cadena.
- Correcto engrasado.
- Tensado inicial y retensados posteriores correctos.

Los cálculos se van a realizar para la configuración 50-11 y si aguanta ahí, lo hará con el resto.

2.3.3 Cadena

El número de tipos y de configuraciones para cadenas es muy amplio. Para la bicicleta es necesaria una de eslabón simple ya que cuanto menos pese el mecanismo, mejor. Además, el paso disponible en los platos no es muy grande por lo que el de la cadena tampoco.

Las partes más importantes de la cadena son:



- Paso (P): Distancia entre los centros de dos rodillos consecutivos. En el piñón coincide, o se aproxima a la distancia entre dos dientes.
- Diámetro de rodillo (D1)
- Diámetro del remache (D2)
- Anchura interior (B): Distancia entre las mallas.
- Anchura exterior (F): Anchura total
- Ancho de malla (G)

Al igual que con los engranajes, lo más importante para un engrane correcto es que el paso del disco y de la cadena sean muy parecidos o coincidan.

2.3.4 Cálculo

Para el proceso de cálculo, se va a mayorar la potencia que transmite la cadena por medio de una serie de coeficientes facilitados por el fabricante. Después, en una tabla de doble entrada, se seleccionará la cadena que aguante la potencia y la velocidad de la cadena.

Esos coeficientes son:

- f_i : Coeficiente de la relación de transmisión
- f_z : Coeficiente del número de dientes (con la rueda más pequeña)
- f_a : Coeficiente de la distancia entre ejes
- f_y : Coeficiente de las condiciones de uso

$$\text{Potencia diagrama } (P_d) = P \cdot f_i \cdot f_a \cdot f_z \cdot f_y$$

Factores para tener en cuenta condiciones de trabajo distintas

Coeficiente de impacto

γ	1	1,5	2	3	4
f_y	1	1,25	1,5	1,75	2

Número de dientes

z	11	13	15	17	19	21	23	25
f_z	1,82	1,52	1,30	1,14	1	0,9	0,81	0,74

Relaciones de transmisión

i	1 : 1	2 : 1	3 : 1	5 : 1
f_i	1,22	1,08	1	0,92

Distancias entre ejes

a	20 p	40 p	80 p
f_a	1,15	1	0,85

Datos iniciales

Al plato se le designa con el subíndice 1 y al piñón con el subíndice 2.

$$z_1 = 50, \quad z_2 = 11, \quad \phi_1 = 214 \text{ mm}, \quad n_1 = 110 \text{ rpm}, \quad P = 1.2 \text{ kW}$$

La longitud que deberá tener la cadena se obtiene según la ecuación (). Con $C = 40,8 \text{ cm}$

$$L = \left((2 (40.8) \times 0,39) + \left(\frac{50}{4} + \frac{23}{4} + 1 \right) \right) \times 2,54 = 129.72 \text{ cm}$$

Esa longitud corresponde a cuando está engranado el piñón mayor pero para realizar el cálculo, el cambio se va a omitir por lo que será necesario hallar la distancia entre ejes ficticia que hay entre el plato y el piñón pequeño con esa longitud de cadena. La aproximación es válida debido a que el coeficiente que mayor la potencia en función de la distancia entre ejes disminuye cuanto mayor es ésta.

Para una longitud de cadena de 129,72 cm y el piñón pequeño de 11 dientes sólo hay que despejar C de la ecuación(). $C = 44.62 \text{ cm}$

Una vez calculada la distancia entre los centros de los engranajes necesaria, se puede empezar con los coeficientes f .

- Coeficiente de la relación de transmisión:

$$i = \frac{z_1}{z_2} = \frac{50}{11} = 4.55$$

Además es posible obtener el número de revoluciones de la rueda 2:

$$i = \frac{n_1}{n_2}, \quad n_2 = 500 \text{ rpm}$$

Para una relación de transmisión $i = 4.85$ es necesario realizar una interpolación lineal con los valores conocidos de f_i con $i = 3$ e $i = 5$ de la tabla.

$$f_{i4.55} = 1 - \frac{(4.55 - 3)(1 - 0.92)}{5 - 3} = 0.9384$$

- Coeficiente del número de dientes de la rueda pequeña:

Para un valor de $z_2 = 11$ la tabla devuelve un coeficiente $f_z = 1.82$

- Coeficiente de la distancia entre ejes

El paso p de la rueda dentada se define como:

$$p = \frac{\pi \phi}{z} = \frac{\pi \times 214}{50} = 13.446 \text{ mm}$$

La tabla pide hallar la relación entre el distancia entre ejes y el paso para hallar el coeficiente f_a .

$$a = xp$$

$$x = \frac{a}{p} = \frac{446.2}{13.446} = 33.18$$

Como en la tabla solo aparece el dato para 20 y 40 veces el paso, es necesario realizar una interpolación para aproximar el valor de 33.18p:

$$f_{a33.18} = 1.15 - \frac{(33.18 - 20)(1.15 - 1)}{40 - 20} = 1.0515$$

- Coeficiente de las condiciones de uso

El uso que se le va a dar a esta cadena no está dentro de los que aparecen en la tabla aunque se puede aproximar y finalmente se decide un coeficiente de impacto de 1,5 sobre los posibles: 1, 1.5, 2, 3, 4.

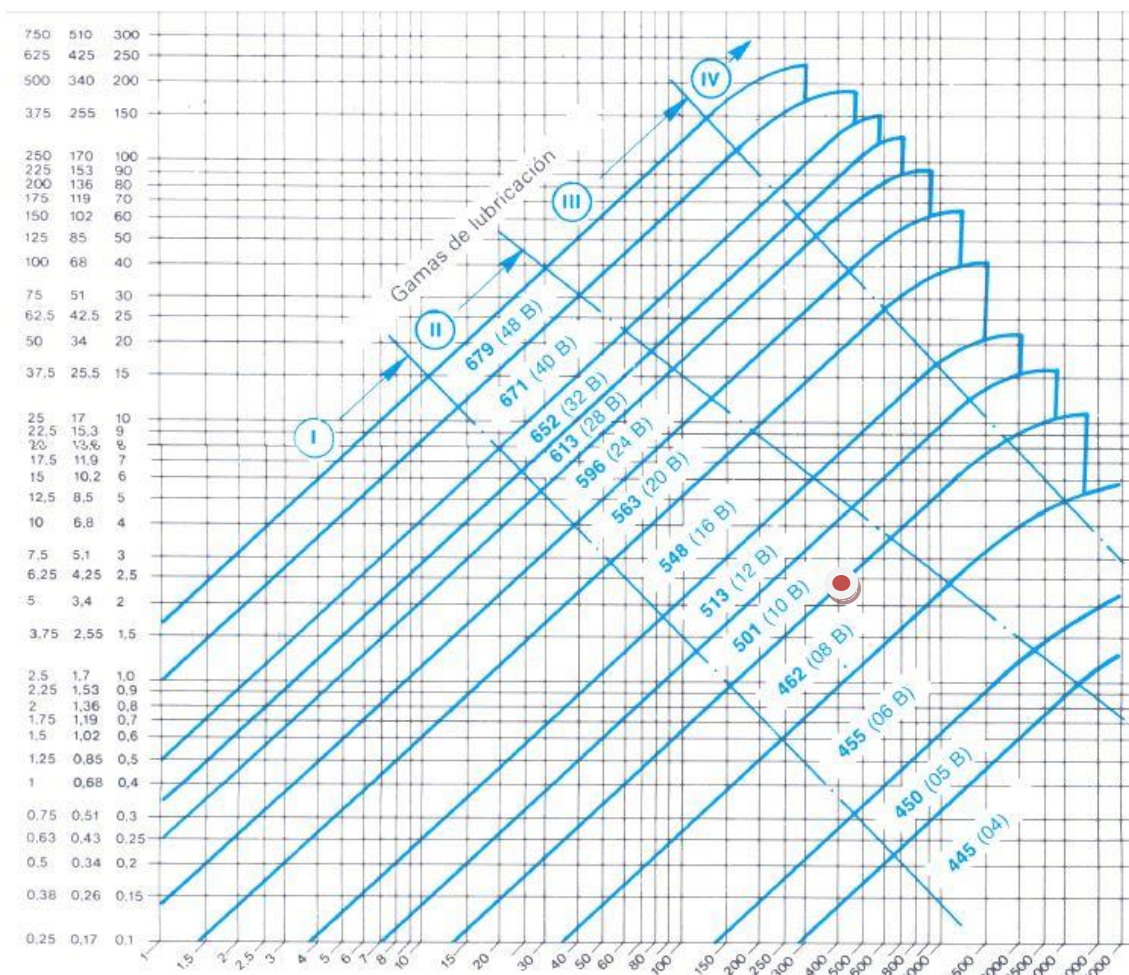
Para este coeficiente de impacto, $f_y = 1.25$

Una vez hallados todos los coeficientes, la potencia de diagrama queda definida x

$$P_D = 1.2 \times 0.9384 \times 1.82 \times 1.0515 \times 1.25 = 2.694 \text{ kW}$$

El diagrama en el que se elige la cadena según la norma DIN8187 indica:

- Eje de abscisas: rpm de la rueda pequeña
- Eje de ordenadas: Potencia de diagrama según la cadena (simple, doble o triple)



Se señala el punto exacto que indica qué cadena utilizar con la marca roja. Corresponde a una cadena de rodillos nº 462 (08-B-1). La norma ordena los tipos de cadenas y señala sus características. Si buscamos este modelo aparece la siguiente información sobre la cadena:

- Paso (P): 12.7mm
- Diámetro de rodillo (D1): 8.51 mm
- Diámetro del remache (D2): 4.45 mm
- Anchura interior (B): 7.75 mm
- Anchura exterior (F): 18.5 mm
- Ancho de malla (G): 11.7 mm
- Carga máxima de rotura : 1900 Kg

Material: Acero, Niquelada, Acero inoxidable

Rfcia. JOCAR	Norma ISO	P x B Pulgadas	P x B mm.	D1	D2	F	G	Rotura Kg
NORMA EUROPEA DIN 8187								
110	--	3/8 x 5/32	9.525 x 3,94	6.35	3.31	12.8	8.1	1000
120	06B-1	3/8 x 7/32	9.525 x 5.72	6.35	3.31	14.8	8.1	1000
140	081	1/2 x 1/8	12,70 x 3,30	7.75	3.61	11.5	9.5	820
145	084	1/2 x 3/16	12,70 x 4,88	7.75	3.91	14.7	10.2	1600
190	08B-1	1/2 x 5/16	12,70 x 7.75	8.51	4.45	18.5	11.7	1900
195	----	5/8 x 1/4	15,87 x 6,48	10.16	5.08	19.0	14.2	2600
200	10B-1	5/8 x 3/8	15,87 x 9,65	10.16	5.08	21.4	14.2	2600
210	12B-1	3/4 x 7/16	19,05 x 11,68	12.07	5.72	24.5	16.4	3200
220	16B-1	1 x 0,67	25,4 x 17,02	15.87	8.27	36.2	21.0	6600
230	20B-1	1 1/4 x 3/4	31,75 x 19,56	19.05	10.15	44.9	25.0	9500
240	24B-1	1 1/2 x 1	38,1 x 25,4	25.40	14.55	60.0	34.5	16000
250	28B-1	1 3/4 x 1 1/4	44,45 x 30,99	27.94	15.85	71.4	37.0	20000
260	32B-1	2 x 1 1/4	50,8 x 30,99	29.21	17.75	71.4	42.0	25000

Ahora hay que comprobar si la cadena funciona bien con la rueda más pequeña y cuál va a ser el número de eslabones necesarios.

Los diámetros primitivos de las ruedas dentadas son:

$$d_0 = \frac{p}{\sin\left(\frac{180}{z_n}\right)}, \quad d_0^1 = 202.25 \text{ mm}, \quad d_0^2 = 45.07 \text{ mm}$$

Como los diámetros primitivos para ese paso de cadena resultan menores que los totales de las ruedas, la cadena funciona correctamente.

El número de eslabones para una cadena que funciona con ruedas que tienen diferente número de dientes se obtiene mediante la siguiente fórmula facilitada por el fabricante:

$$X = 2 \frac{a}{p} + \frac{z_1 + z_2}{2} + \frac{C}{a} p$$

Para este cálculo, la distancia entre ejes es la real y el número de dientes de la conducida es la del piñón grande ya que de lo contrario, al ser distancia entre ejes ficticia mayor el

número de eslabones lo sería también y habría problemas con el cambio para ajustar la tensión.

El parámetro C se calcula de la siguiente forma:

$$C = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{2\pi}\right)^2, \quad C = 18.47$$

Finalmente el número de eslabones que se van a necesitar es:

$$X = 2 \frac{408}{12.7} + \frac{50 + 23}{2} + \frac{18.47}{408} 12.7 = 102$$

2.3.5 Conclusión y decisión final

Tras realizar algunos cálculos para seleccionar la cadena de la bicicleta, el resultado final coincide con el paso que llevan en realidad las bicicletas. Tiene lógica ya que es una cadena que pesa poco y resiste bien los pedaleos durante un gran número de ciclos de pedaleo. No se ha mencionado nada hasta ahora acerca de la lubricación pero es conveniente que la cadena siempre tenga un grado óptimo de lubricante y a poder ser uno antipolvo para que al andar por calzadas sucias o con pequeñas piedras no pase nada en caso de que algo se incruste en el mecanismo. Otro argumento para que siempre se tenga una buena lubricación es la velocidad a la que se mueve la cadena. En desarrollos que permitan alta cadencia la cadena tendrá una velocidad lo suficientemente importante para que esté bien lubricada ya que sino pueden existir problemas serios de desgaste tanto de plato como de cadena o de incluso la rotura.

Por lo tanto, la solución elegida para el cuadro de bicicleta de fibra de carbono es montar el siguiente conjunto cadena-engranajes:

- Platos Shimano Dura Ace FC-9000 50-34T
- Casette Shimano Dura Ace CS-7700 9 speed 11-23T
- Cadena de acero inoxidable 08-B1 según la norma ISO con las siguientes medidas:
 - Paso (P): 12.7mm
 - Diámetro de rodillo (D1): 8.51 mm
 - Diámetro del remache (D2): 4.45 mm
 - Anchura interior (B): 7.75 mm
 - Anchura exterior (F): 18.5 mm
 - Ancho de malla (G): 11.7 mm
 - Carga máxima de rotura : 1900 Kg

2.4 FUERZAS SOBRE EL CUADRO

Este apartado busca hallar qué fuerzas se aplican sobre el cuadro cuando el ciclista lo monta. Se suponen dos situaciones: pedaleo normal y una situación de esfuerzo máxima. Después, una vez conocidas las fuerzas que actúan sobre el cuadro será momento de calcular cómo aguanta el material del que está fabricado y cómo se comporta.

2.4.1 Restricciones del cuadro

Para poner bien las restricciones hay que entender cómo y dónde actúan las fuerzas sobre el cuadro. En esta simulación no se tienen en cuenta las ruedas, el manillar ni la horquilla de la dirección por lo que es necesario averiguar primero el diagrama de sólido libre e ir trasladando algunas de las fuerzas hasta que toman contacto con el cuadro.

Una primera idea de esto es la siguiente imagen:

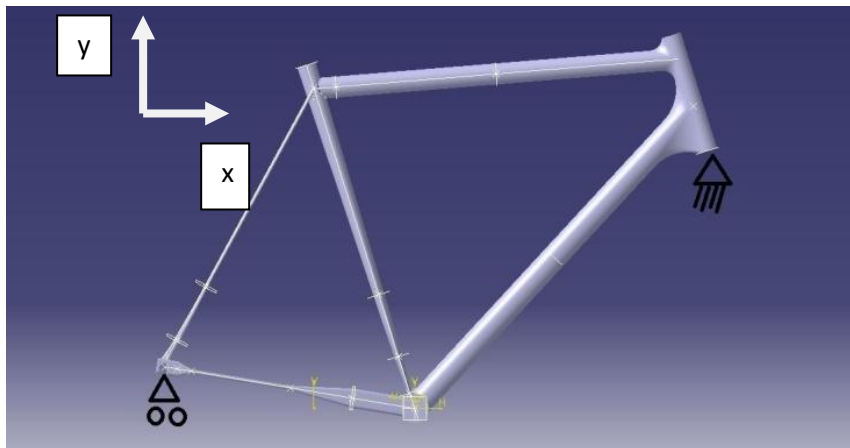


En la imagen se pueden observar las siguientes fuerzas:

- N_1 y N_2 : Fuerzas normales de contacto con el suelo. Su dirección es perpendicular a la huella de contacto.
- F_1 , F_2 y F_3 : Son las causadas por ciclista. F_1 y F_2 son el peso en el manillar y sillín respectivamente mientras que F_3 es la componente de peso y fuerza al pedalear sobre las bielas.
- mg : Es el peso del cuadro aplicado sobre su centro de gravedad.

También existe una tensión generada en la cadena al pedalear, que produce una reacción en el buje trasero y en el eje de la caja del pedalier. Más adelante se profundizará en este aspecto.

Una vez vistas las fuerzas que actúan sobre la bici, las restricciones aplicadas en el cuadro son las siguientes:



En los bujes traseros se va a limitar el desplazamiento en 'Y' y 'Z' (perpendicular al plano XY) y en la barra de la dirección se limitan los 3 desplazamientos aunque sin impedir los giros. El motivo de esta decisión es que una parte de la fuerza que va a realizar la cadena sobre los bujes tiene la dirección del eje X por lo que producirá desplazamientos en esa dirección por pequeños que sean.

2.4.2 Deducción de las fuerzas que actúan sobre el cuadro

Hay que trasladar las fuerzas al cuadro de forma que la variación con la simulación teniendo en cuenta otras partes y la que se va a realizar difieran en poco o nada.

Peso corporal:

Por cuestiones de seguridad, se va a tomar un coeficiente de mayoración de 2 para este parámetro. Los puntos de aplicación son 2 ya que aunque las piernas tienen peso, esta fuerza va incluida en el resultado que ofrece el potenciómetro:

- Manillar: Se supone que está aplicado el 20% del peso corporal. Al no formar parte del diseño se supone como una carga puntual sobre la tija dividida por igual.
- Sillín y pedales: Sobre estas dos partes se aplica el 80% del peso corporal.

Estas fuerzas siempre se aplican en la dirección del eje del tubo o en caso de la biela en perpendicular al pedal, que siempre se halla en posición paralela al suelo.

2.4.2.1 Fuerzas sobre la caja del pedalier

La caja del pedalier absorbe las fuerzas producidas por el pedal en la acción del pedaleo y también la que causa la cadena por tener una tensión y estar transmitiendo una potencia.

Para calcular las reacciones que hay en la cadena y su transmisión al cuadro se parte de la potencia que desarrolla el ciclista arrojada sobre el potenciómetro incorporado en el plato. Para los diferentes casos imaginados en este proyecto se parten de datos aproximados obtenidos en foros de ciclismo.

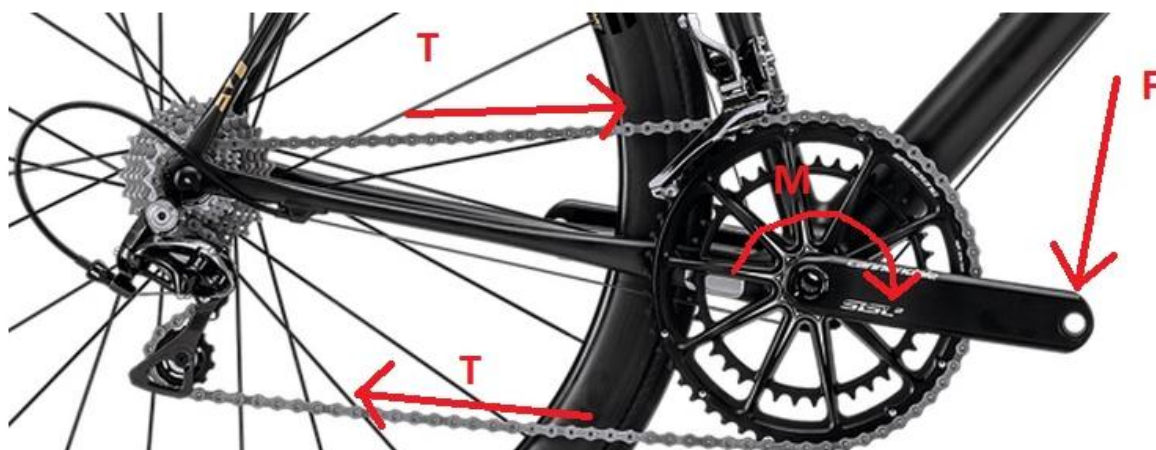
Se sabe que la potencia P:

$$P = \omega \times M$$

Siendo ω la velocidad angular y M el par sobre el eje creado por el pedaleo.

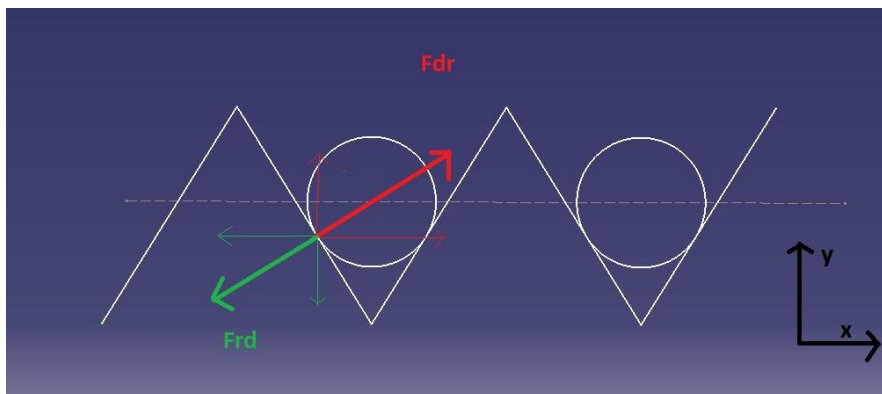
Este par es producido por una fuerza sobre la biela. Sabiendo que $M = F \times d$ y la longitud de las bielas, la fuerza ejercida por el ciclista sobre el pedal es conocida. Para que exista equilibrio de fuerzas y momentos, la biela generará una fuerza de sentido contrario a la introducida mediante el pedal y un par que se transmitirá a la cadena.

Existe un momento flector sobre el eje del pedalier cuando el pedal se halla en los puntos muertos pero este dato no es tan relevante porque como la distancia entre biela y pedal es de apenas algunos milímetros, este momento es insignificante. Sí es significativa la tensión T que se crea en la cadena al pedalear y que tiende a doblar las vainas y la caja del pedalier.

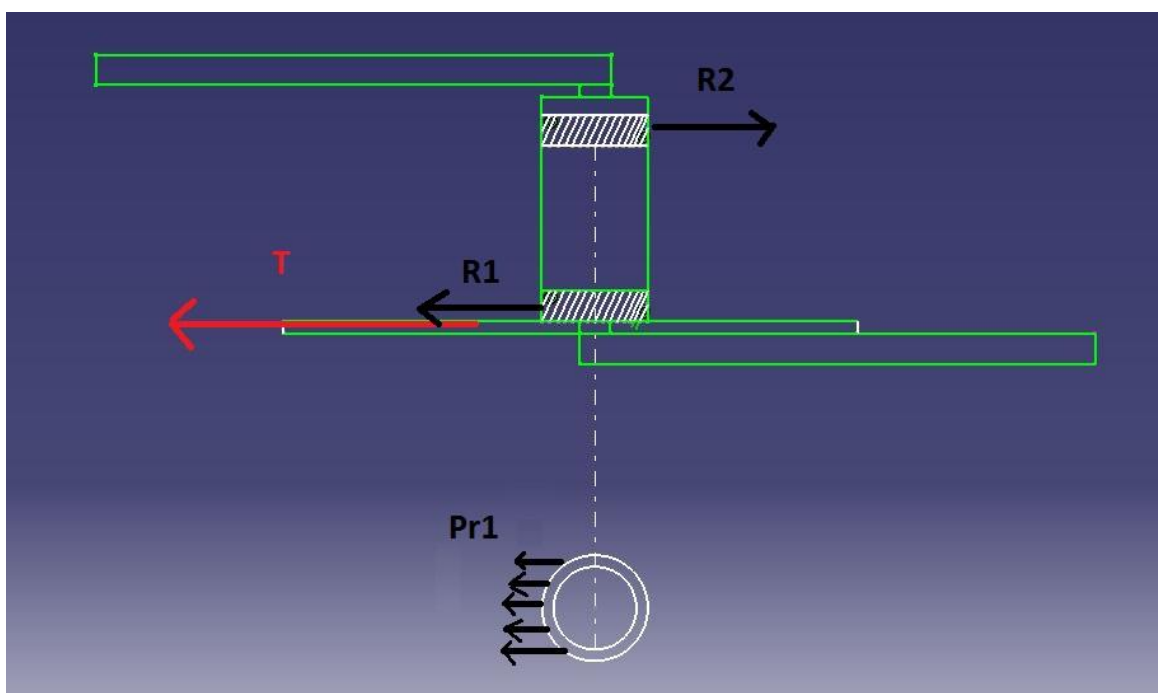


El valor de la tensión viene determinado por el par en el extremo del plato. Éste empuja el rodillo de la cadena y recibe la misma fuerza en sentido contrario. Esa fuerza es transmitida por el plato hasta los rodamientos en contacto directo con la caja del pedalier, donde la fuerza toma contacto con el cuadro. La carga transmitida adopta entonces la forma de presión uniforme repartida entre la mitad del área del rodamiento.

En el siguiente esquema se representa la fuerza ejercida por el plato sobre el primer eslabón de la cadena en tomar contacto y su reacción del mismo módulo y dirección pero distinto sentido sobre el plato.



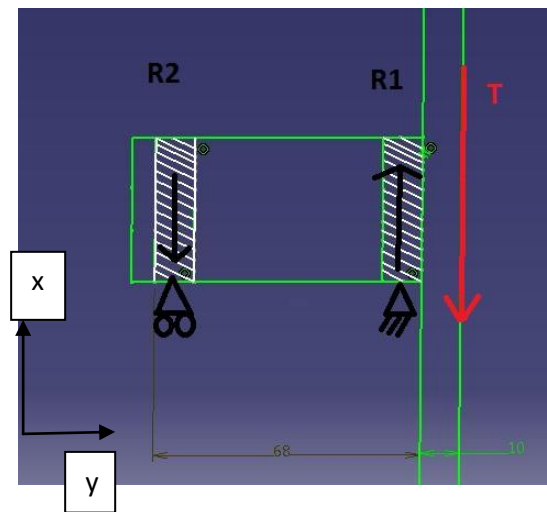
F_{dr} es la fuerza que el diente ejerce sobre el rodillo del eslabón al entrar en contacto y empujarlo y F_{rd} es la que el rodillo le devuelve. La suma de todas las fuerzas que hay sobre cada rodillo de la cadena determina la tensión total. Como también influyen los dientes de los piñones en este resultado, se utiliza la fuerza generada sobre la cadena al pedalear. El esquema resultante con el balance de fuerzas sobre la caja del pedalier es la siguiente:



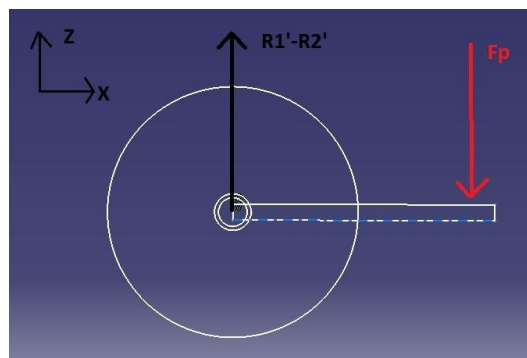
En la ilustración se ven los rodamientos (rayados) y la tensión de la cadena sobre el plato. Esta tensión empuja los rodamientos contra la caja del pedalier y para calcular esas presiones, primero se hallan las fuerzas $R1$ y $R2$ mediante un equilibrio de fuerzas y momentos.

Suponemos el eje del pedalier como una viga apoyada sobre los dos rodamientos. Se cumplen las condiciones de equilibrio:

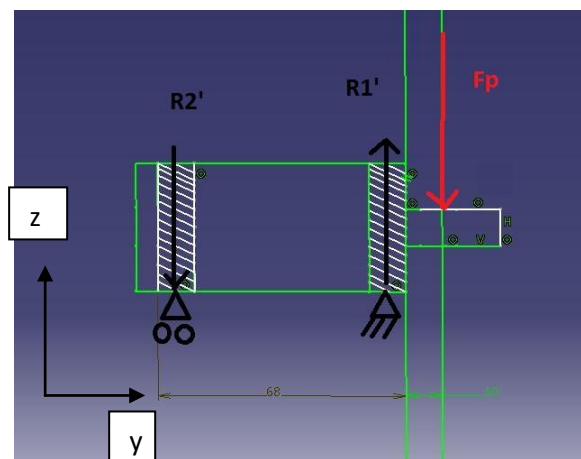
$$\sum F = 0, \sum M_1 = 0$$



Con la fuerza producida en el pedal ocurre lo mismo que con la tensión. Es transmitida desde la biela al rodamiento solo que en este caso es una fuerza en el sentido del eje Z. El esquema queda de la misma manera.



Y sobre la caja del pedalier las fuerzas quedan:



En este caso otra vez han de cumplirse las ecuaciones de equilibrio

$$\sum F = 0, \sum M_1 = 0$$

Una vez halladas las fuerzas resultantes, hay que decir que el sentido en el que se aplican sobre el cuadro es el contrario y que para sacar la presión no hay más que dividir las entre el área de contacto. Como los rodamientos son cilíndricos, la presión resultante será:

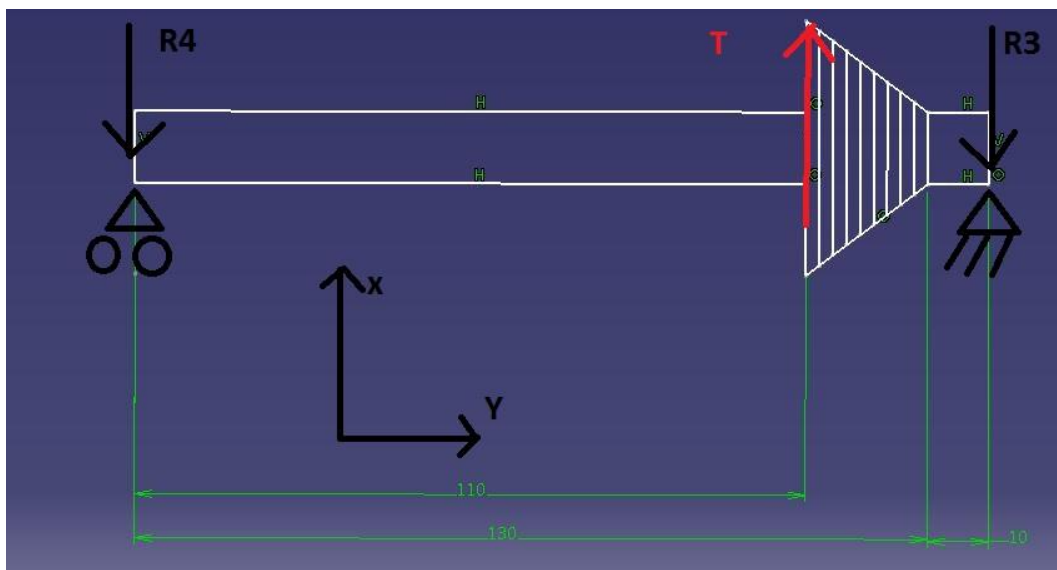
$$P = \frac{F}{\pi r e}$$

Siendo r el radio mayor del rodamiento y e su longitud a lo largo del eje Y.

2.4.2.2 Fuerzas sobre las vainas traseras

El otro sitio en donde la cadena tiene influencia y vuelve a producir reacciones sobre el cuadro es en las vainas inferiores. De nuevo la tensión de la cadena va a producir unas fuerzas sobre el cassette de piñones que van a ser trasladadas al buje de la rueda y al cuadro. Por ser cilíndrico el buje, otra vez va a transmitir las cargas en forma de presión uniforme.

Un esquema de cómo suponer estas fuerzas es el siguiente:



El cassette de piñones soporta una tensión generada por la cadena y ésta lo empuja hacia adelante. Al estar encajado en los huecos para el buje de las ruedas, se oponen al movimiento generando una fuerza sobre el cuadro que este contrarresta. Otra vez vuelve a ser necesario que se cumplan las condiciones de equilibrio.

$$\sum F = 0, \sum M_3 = 0$$

2.4.3 Casuística de situaciones

La fuerza generada en el cuadro para contrarrestar la que entra por la acción de la tensión de la cadena es otra vez una presión porque el buje está en contacto con las vainas no por un punto sino por una superficie.

Como apunte general, es importante decir que todos los esquemas de fuerzas vistos hasta ahora son sobre los rodamientos. Para calcular las fuerzas que ejercen al cuadro hay que suponerlas sobre él de mismo módulo y dirección pero sentido contrario ya que son los rodamientos los que transmiten esas cargas aplicadas sobre ellos al cuadro.

Mecánica de la bicicleta

Hasta ahora no se había hablado del sistema de transmisión de potencia que llevaba equipado la bicicleta más allá de la cadena y su repercusión en las fuerzas que sufre el cuadro. Los datos en los cuales van a basarse los cálculos están íntegramente sacados de la página web de Shimano, fabricante de todo tipo de piezas para bicicletas.

Se han seleccionado:

- Conjunto de platos 50-34 dientes
- Conjunto de piñones 11-23 dientes
- Bielas de 170 mm de longitud
- Diámetro del plato grande: 130 mm

2.4.3.1 Caso 1: Ritmo suave

El primer caso de carga supone que la persona para la que ha sido diseñada se halla montada en una postura normal y pedaleando. Los datos supuestos en esta casuística son los siguientes:

- Peso: 90 kg
- Reparto de peso sillín-pedales manillar: 80%-20%
- Cadencia de pedaleo : 80 pedaladas/minuto
- Potencia de pedaleo: 250 W

Peso corporal:

Por cuestiones de seguridad, se va a tomar un **coeficiente de mayoración de 2** para este parámetro. Los puntos de aplicación son 2 ya que aunque las piernas al apoyarse en los pedales los cargan con el peso, esta fuerza va incluida en el resultado que ofrece el potenciómetro:

- **Manillar:** Se supone que está aplicado el 20% del peso corporal, es decir, 36 Kg. Al no formar parte del diseño se supone como una carga puntual sobre la tija dividida por igual entre los nodos que la componen.
- **Sillín:** Sobre estas dos partes se aplica el 80% del peso corporal: 108 Kg.

Estas fuerzas siempre se aplican en la dirección del eje del tubo o en caso de la biela en perpendicular al pedal, que siempre se halla en posición paralela al suelo.

Fuerzas sobre la caja del pedalier

Los datos de partida del potenciómetro son 250w. **Este parámetro también se va a mayorar multiplicándolo por 2** aunque ahora no importa mucho ya que en el segundo caso de carga la potencia aplicada va a ser bastante mayor.

Datos de partida

Una vez obtenidos los datos iniciales, el análisis se va a realizar con:

- Potencia sobre el eje del pedalier: 500W
- Peso del corredor 180 Kg
- Cadencia de pedaleo: 80 rpm

Fuerzas sobre el eje del pedalier

Potencia y par:

$$500 \text{ W} = \frac{80 \text{ r.p.m} \times 2\pi}{60 \frac{\text{s}}{\text{m}}} \times \tau, \quad \tau = 59.683 \text{ N.m}$$

Par y fuerza sobre el eje del pedalier:

$$59.683 \text{ N.m} = F_p \times 0.170 \text{ m}, \quad F_p = 351.076 \text{ N}$$

Tensión de la cadena en el plato:

$$59.683 \text{ N.m} = T \times \frac{0.130 \text{ m}}{2}, \quad T = 918.15 \text{ N}$$

- **Fuerzas en el eje Z sobre los rodamientos**

De acuerdo con el esquema y la situación de equilibrio:

$$-F_p + R'_1 - R'_2 = 0, \quad -F_p \times d_p + R'_1 \times d = 0$$

$$-351.076 + R'_1 - R'_2 = 0, \quad -351.076 \times 0.078 + R'_1 \times 0.068 = 0$$

$$F_p = -351.076 \text{ N}, \quad R'_1 = 402.69 \text{ N}, \quad R'_2 = -51.62 \text{ N}$$

El sentido de las fuerzas tiene lógica ya que al tirar hacia abajo el peso, este va a hacer palanca sobre la caja del pedalier, y esas son las fuerzas que resultan ante un movimiento de palanca. De acuerdo con el principio de acción y reacción, las fuerzas transmitidas al cuadro serán de mismo módulo y dirección pero sentido contrario.

- **Fuerzas en el eje X**

La cadena transmite su tensión en esta dirección por lo que generará fuerzas tanto en los rodamientos de la caja del pedalier como en las vainas traseras donde van anclados los piñones.

-Eje del pedalier y rodamientos

El balance de fuerzas tiene que tener idéntico sentido que en el caso anterior ya que el esquema de fuerzas es igual y solo cambia la dirección de estas.

Cumpliendo las condiciones de equilibrio tal y como se ha descrito en la imagen ()

$$-T + R_1 - R_2 = 0, \quad -T \times d_T + R_1 \times d = 0$$

$$-918.15 + R_1 - R_2 = 0, \quad -918.15 \times 0.078 + R_1 \times 0.068 = 0$$

$$T = -918.15 \text{ N}, \quad R_1 = 1053.17 \text{ N}, \quad R_2 = -135.2 \text{ N}$$

-Vainas traseras (rodamientos)

En este caso, el sentido de las fuerzas no va a ser diferente porque al estar el cassetté entre los dos apoyos no va a hacer palanca sino a empujarlos hacia adelante.

De acuerdo con las dimensiones del esquema y las condiciones de equilibrio

$$T - R_3 - R_4 = 0, \quad 918.15 \times d_p - R_4 \times d = 0$$

$$918.15 - R_3 - R_4 = 0, \quad 918.15 \times 0.110 - R_4 \times 0.130 = 0$$

$$T = 918.15 \text{ N}, \quad R_3 = 776.89 \text{ N}, \quad R_4 = 141.26 \text{ N}$$

Otra vez las fueras transmitidas a las vainas son de mismo módulo y dirección pero de sentido contrario. De acuerdo a lo explicado antes, hay que transformar esas fuerzas en presiones ya que es como realmente actúan. La superficie de contacto donde se va a realizar la presión en el caso de los rodamientos va a ser la mitad de la total de estos y en las vainas, la mitad del buje de la rueda.

Ambas formas son cilíndricas ya que contienen el eje del pedalier y el buje, que también lo son. La superficie de un cilindro es $2\pi\rho h$ siendo ρ el radio y h su altura.

Los rodamientos poseen un radio casi idéntico al de la caja del pedalier y una 'altura' de 10 mm. Por tanto, la presión estará transmitida a través de un área efectiva en mm^2 :

$$A = \pi \times 23 \times 10 = 722.56 \text{ mm}^2$$

Por lo tanto, las presiones resultantes en MPa sobre la caja del pedalier producidas por la cadena y el pedal son:

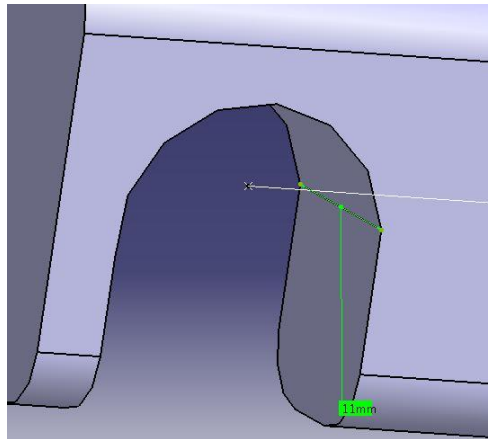
$$P_{R_1} = \frac{1053.17 \text{ N}}{722.56 \text{ mm}^2} = 1.457 \text{ Mpa}$$

$$P_{R_2} = \frac{135.2 \text{ N}}{722.56 \text{ mm}^2} = 0.187 \text{ Mpa}$$

$$P_{R'_1} = \frac{402.69 \text{ N}}{722.5 \text{ mm}^2} = 0.557 \text{ Mpa}$$

$$P_{R'_2} = \frac{51.62 \text{ N}}{722.5 \text{ mm}^2} = 0.071 \text{ Mpa}$$

Sin embargo, en las vainas, el área de contacto es diferente. El radio del cilindro es 7,5 mm y su profundidad 11 mm como se puede ver en la imagen. Al ser la presión hacia un sentido, en el otro no se ejerce nada luego el área efectiva será la mitad del área del semicilindro.



El área resultante $A' = \frac{\pi \times 7.5 \times 11}{2} = 129.6 \text{ mm}^2$ y las presiones resultantes:

$$P_{R_3} = \frac{776.89 \text{ N}}{129.6 \text{ mm}^2} = 5.99 \text{ Mpa}$$

$$P_{R_4} = \frac{141.26 \text{ N}}{129.6 \text{ mm}^2} = 1.09 \text{ Mpa}$$

2.4.3.2 Caso 2: Sprint

En esta situación se va a suponer que el ciclista pedalea a plena potencia. Hay profesionales que marcan picos de 1,6 kW pero en este caso se va a tomar como referencia un dato algo más realista. La potencia elegida es 1,2 kW ya que se adapta más a lo que la mayoría de la gente puede rendir en ciertos momentos de esfuerzo máximo.

No es simplemente un análisis igual que el anterior en el que sólo varía la cifra de potencia. Para desarrollarla el ciclista ya no va sentado sino que adopta una postura de ataque o esprint y por ello las cargas producidas por su peso corporal cambian respecto al caso anterior. La tija del manillar va a ver incrementada el porcentaje de peso corporal en hasta un 40%.

De nuevo se van a utilizar los mismos coeficientes de mayoración de mayoración para el peso y la potencia por lo que los datos de partida son los siguientes:

- Peso: 90 kg
- Reparto de peso pedales-manillar: 50%-50%
- Cadencia: 100 rpm
- Potencia de pedaleo: 1,2 kW

Al aplicar los coeficientes de mayoración los datos para el análisis resultan:

- Peso: 180 kg
- Reparto de peso pedales-manillar: 50%-50%
- Cadencia: 100 rpm
- Potencia de pedaleo: 2.4 kW

Peso corporal

En esta situación el ciclista se halla de pie sobre la bici y con el cuerpo desplazado hacia adelante. Esto hace que se generen fuerzas en el manillar, que son transmitidas a la tija de la dirección así como en el eje del pedalier debido al aumento de carga. Para la consideración de las fuerzas sobre los pedales y sobre la caja del pedalier se va a tener otra vez en cuenta el mismo razonamiento de antes con el potenciómetro. Este dispositivo marca la potencia total que se genera en ese momento sobre las bielas por lo que la potencia que genera el peso de las piernas al moverse sin contar la fuerza muscular va incluido en el cálculo total. Cuando no se pedalea el dispositivo marca cero en pantalla porque aunque haya fuerzas si no hay velocidad no se desarrolla potencia. En ese caso sí que se contaría aparte el peso corporal pero en este caso no es necesario. Por lo tanto, esta vez **sobre el manillar se cargan 90 kg**. Como el manillar está dividido en 40 nodos, la carga nodal resulta 22.07 N

Fuerzas sobre la caja del pedalier

Otra vez el proceso de cálculo es igual que en el caso de carga anterior:

Potencia y par:

$$2400 \text{ W} = \frac{100 \text{ r.p.m} \times 2\pi}{60 \frac{\text{s}}{\text{m}}} \times \tau, \quad \tau = 229.183 \text{ N.m}$$

Par y fuerza sobre el eje del pedalier:

$$229.183 \text{ N.m} = F_p \times 0.170 \text{ m}, \quad F_p = 1348.14 \text{ N}$$

Tensión de la cadena en el plato:

$$229.183 \text{ N.m} = T \times \frac{0.130 \text{ m}}{2}, \quad T = 3525.89 \text{ N}$$

- **Fuerzas sobre el eje z sobre los rodamientos**

Los datos de entrada son diferentes pero el balance de fuerzas y momentos permanece invariable:

$$-F_p + R'_1 - R'_2 = 0, \quad -F_p \times d_p + R'_1 \times d = 0$$

$$-1348.14 + R'_1 - R'_2 = 0, \quad -1348.14 \times 0.078 + R'_1 \times 0.068 = 0$$

$$F_p = -1348.14 \text{ N}, \quad R'_1 = 1546.39 \text{ N}, \quad R'_2 = -198.25 \text{ N}$$

Las fuerzas que se aplican sobre el cuadro en forma de reacciones en los rodamientos tienen el sentido contrario al que se ha calculado ahora, debido a la 3º Ley de Newton, el principio de acción y reacción.

- **Fuerzas en el eje x**

-Eje del pedalier y rodamientos

El equilibrio de fuerzas ha de ser el mismo que en el caso anterior solo que en el eje x:

$$-T + R_1 - R_2 = 0, \quad -T \times d_T + R_1 \times d = 0$$

$$-3525.89 + R_1 - R_2 = 0, \quad -3525.89 \times 0.078 + R_1 \times 0.068 = 0$$

$$T = -918.15 \text{ N}, \quad R_1 = 4044.40 \text{ N}, \quad R_2 = -518.51 \text{ N}$$

-Vainas traseras (rodamientos)

De acuerdo con las dimensiones del esquema y las condiciones de equilibrio para este caso:

$$T - R_3 - R_4 = 0, \quad T \times d_p - R_4 \times d = 0$$

$$3525.89 - R_3 - R_4 = 0, \quad 918.15 \times 0.110 - R_4 \times 0.130 = 0$$

$$T = 918.15 \text{ N}, \quad R_3 = 2983.45 \text{ N}, \quad R_4 = 542.44 \text{ N}$$

Otra vez es necesario apuntar que las fuerza que se aplican sobre el cuadro, tienen igual módulo y dirección pero sentido opuesto.

De nuevo hay que hallar las presiones resultantes sobre la caja del pedalier y las vainas:

$$P_{R_1} = \frac{4044.40 \text{ N}}{722.56 \text{ mm}^2} = 5.60 \text{ Mpa}$$

$$P_{R_2} = \frac{518.51 \text{ N}}{722.56 \text{ mm}^2} = 0.718 \text{ Mpa}$$

$$P_{R'_1} = \frac{1546.39 \text{ N}}{722.5 \text{ mm}^2} = 2.14 \text{ Mpa}$$

$$P_{R'_2} = \frac{198.25 \text{ N}}{722.5 \text{ mm}^2} = 0.274 \text{ Mpa}$$

$$P_{R_3} = \frac{2983.45 \text{ N}}{129.6 \text{ mm}^2} = 23 \text{ Mpa}$$

$$P_{R_4} = \frac{141.26 \text{ N}}{129.6 \text{ mm}^2} = 4.19 \text{ Mpa}$$

2.5 ANÁLISIS Y CÁLCULOS DE LAS DISTINTAS COMBINACIONES CON MATERIAL COMPUESTO PARA EL CUADRO

Una vez halladas las solicitaciones sobre el cuadro, sus puntos de aplicación y haberlas introducido en el preproceso de Marc Mentat, es hora de calcular y analizar desde el punto de vista correcto los resultados volcados por el programa.

2.5.1 Criterios de análisis

El objetivo de los cálculos no es tanto hallar las tensiones que se generan en el cuadro y en qué dirección sino por medio de los criterios de fallo explicados en la memoria, ver si las capas aguantan o no y si el conjunto puede trabajar de forma segura y adecuada. Otro objetivo es demostrar que la variación de la orientación del material puede resultar muy útil para solucionar problemas sin tener que gastar más material de forma innecesaria.

Por lo tanto, se va a realizar una comparación en ambos casos de carga entre distintos espesores de lámina, orientaciones y espesores de laminado. Los resultados siempre podrán servir de base a una futura optimización de esos valores en otro estudio diferente.

2.5.2 Cumplimiento de los criterios de fallo

Los elegidos han sido el de Máxima tensión principal y el de Tsai-Wu. En ambos criterios, Marc presenta una escala de 0 a 1, que representa los puntos donde estos criterios se cumplen y el material aguanta. Además, al presentar la información por láminas, puede que en algunas se cumplan y en otras no. Es decisión de los diseñadores asumir si es aceptable y sopesar el riesgo general ya que en los materiales compuestos, el hecho de que falle una lámina no significa que el laminado vaya a romperse, ni mucho menos.

2.5.3 Caso de carga 1:

En este caso se simula que el ciclista pedalea un ritmo relajado. Los datos de partida ya con el coeficiente de mayoración igual a 2 aplicados son:

- Potencia: 500W
- Peso del ciclista 180 Kg
- Porcentaje de peso: 80% tubo del sillín-20% tubo de dirección.

Que una vez tratados, se transformaban en las siguientes cargas directas sobre el cuadro:

- Fuerza sobre los nodos de la barra de dirección: 8.8N/nodo
- Fuerza sobre el tubo del sillín: 35 N/nodo
- Presiones en caja del pedalier:

$$P_{R_1} = 1.457 \text{ Mpa}$$

$$P_{R_2} = 0.187 \text{ Mpa}$$

$$P_{R'_1} = 0.557 \text{ Mpa}$$

$$P_{R'_2} = 0.071 \text{ Mpa}$$

- Presiones en las vainas

$$P_{R_3} = 5.99 \text{ Mpa}$$

$$P_{R_4} = 1.09 \text{ Mpa}$$

En el anterior apartado ya ha quedado explicado cuáles eran los puntos de aplicación de las presiones y sus correspondientes direcciones.

2.5.3.1 Bases para la simulación

Se parte con la idea de demostrar cómo afecta la variación de la dirección de forma notable en los resultados finales. Para realizar tal demostración, se han realizado diferentes casos de estudio en las dos situaciones de carga propuestas inicialmente. Al ser no muy grandes las solicitaciones supuestas, este caso se estudiará solo con un espesor para cada tubo. Más adelante también se variarán los espesores para ver su influencia. El orden de las láminas, que se utilizará para los criterios de fallo, está numerado de la más superficial a la menos.

2.5.3.2 Espesor de los tubos inicial

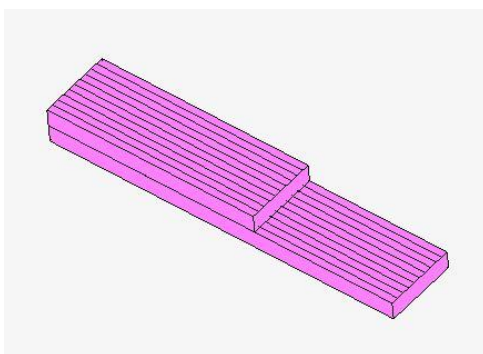
- Tubo de dirección: 0.4 mm
- Tubo horizontal: 0.6 mm
- Tubo oblicuo o diagonal: 0.6 mm
- Tubo del sillín: 0.7 mm
- Caja del pedalier: 0.5 mm
- Vainas superiores: 0.4 mm
- Vainas inferiores: 0.4 mm

Marc Mentat da la opción de calcular la masa de la pieza conocida su densidad. La densidad de la fibra de carbono, en unidades del SI es $1750 \text{ Kg}/\text{m}^3$. Con estos espesores de tubo, la masa total es de 0,250 Kg.

2.5.3.3 Estudio 1

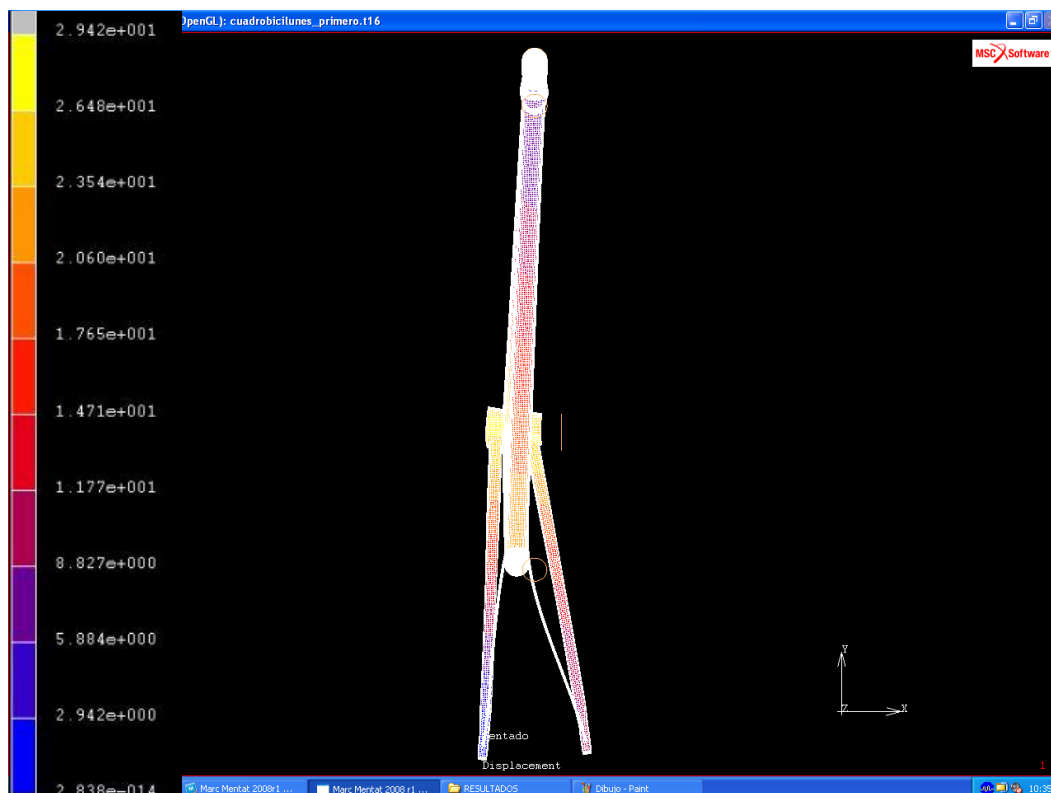
En este caso, se va a suponer un laminado compuesto por tan sólo dos láminas y orientadas 0° respecto la dirección del elemento, o lo que es lo mismo, el eje de las diferentes barras. El espesor de cada lámina es del 50% del espesor del laminado aunque si están orientadas en la misma dirección no importa ya que el resultado final es el mismo. Si importaría en caso de que repercutiese en el espesor total pero como ahora se habla de espesores relativos no influye.

El aspecto del composite si se ampliase un cacho sería el siguiente:



Analizando los resultados de los desplazamientos, se obtienen los siguientes datos:

El desplazamiento máximo de un punto es 26.48 mm y el mínimo casi 3mm. Se aprecia a simple vista en las imágenes que es bastante notable.



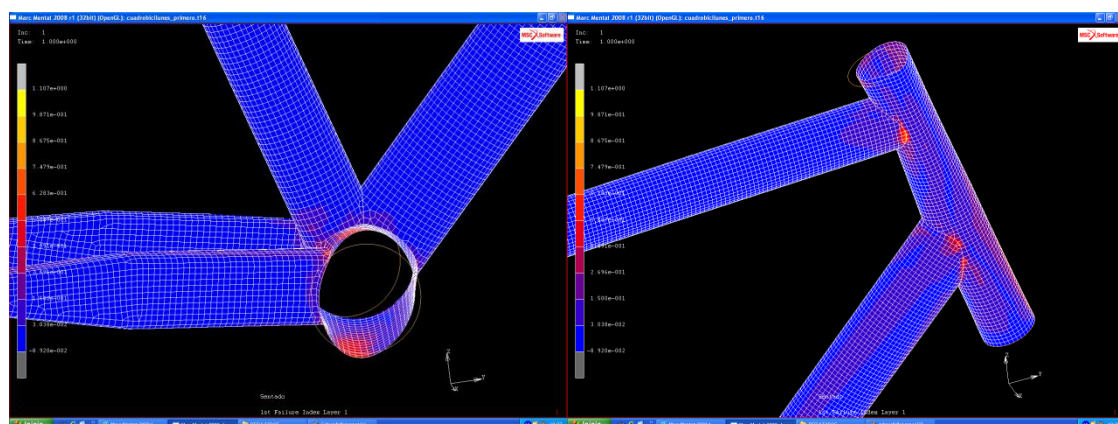


Las mayores deformaciones tienen lugar en las zonas en las que producía presión la cadena: la caja del pedalier y la vaina trasera derecha. Estos valores son altos y para comprobar si realmente podrían ser reales, hay que ver qué resultados arrojan los criterios de fallo.

CRITERIO DE MÁXIMA TENSIÓN PRINCIPAL

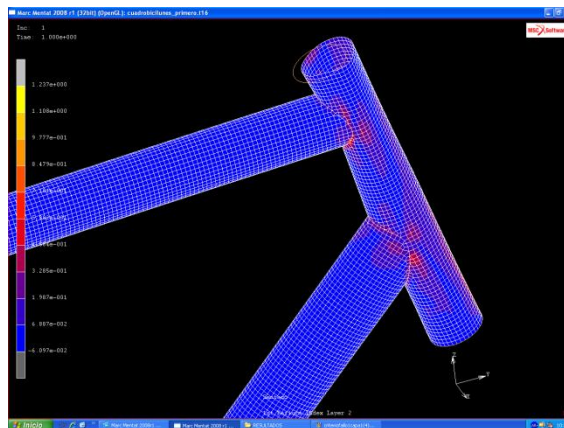
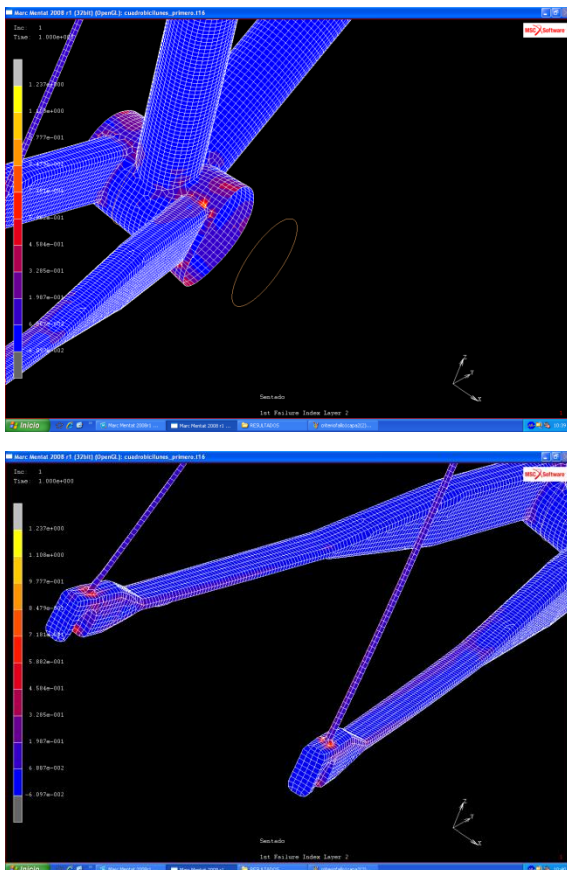
Después de ver las máximas deformaciones, es lógico mirar ahí qué dicen estos criterios de fallo porque si en la zona más deformada, y por ende, solicitada aguanta, lo hará en el resto de la pieza. Estas zonas son la caja del pedalier y la unión entre vainas. También se revisa la barra de dirección por seguridad.

Lámina 1



Los puntos más críticos, marcados en amarillo, no cumplen el criterio. No hace falta escribir cuál es la escala de forma numérica, porque al estar acotada entre 0 y 1 se ve con claridad qué puntos cumplen el criterio. Parece que en la primera lámina hay zonas muy cargadas pero aguantan la mayoría de los elementos.

Lámina 2



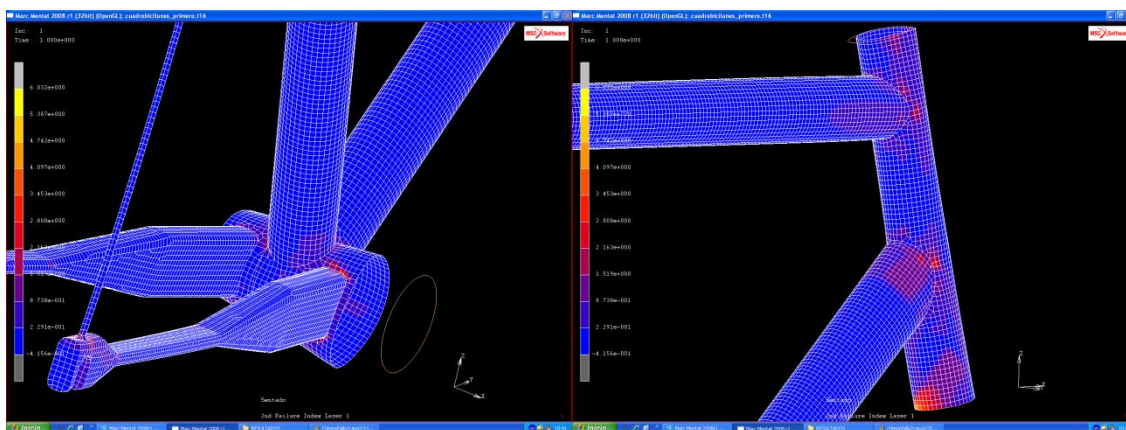
Para esta segunda lámina, las tensiones son algo más pequeñas y no generan fallo de ningún tipo. Esta vez, aparecen ciertos puntos problemáticos en la unión de las vainas pero como anteriormente no había problema alguno, pueden darse por válido el análisis. Veamos ahora qué ocurre si se analiza con el segundo criterio de fallo elegido.

CRITERIO DE TSAI-WU

Este criterio, al igual que el anterior va a tener una escala que va de 0 a 1 y en cualquier caso, cualquier valor mayor que uno significará que el material rompe por esa parte. Salvo que se haga algún comentario, la escala cromática vuelve a tener un rango de 0 a 1 siendo el color azul 0 y el color morado el 1. Este criterio es más exacto y demuestra que hay zonas, más pequeñas que antes, que no pasan el test.

Lámina 1

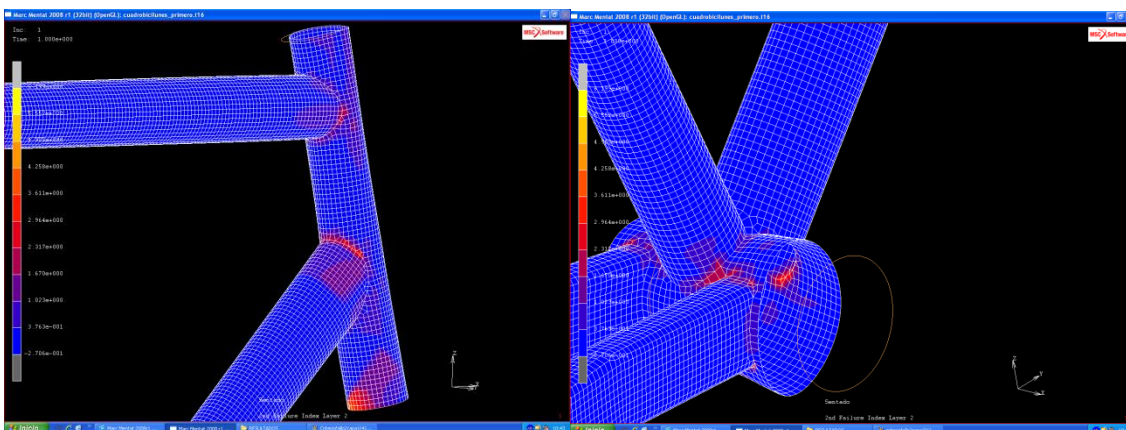
En esta lámina vuelven a presentarse puntos de color rojo o amarillo en las mismas zonas que antes. Tiene sentido ya que aunque sean criterios diferentes, las zonas más cargadas sobresaldrán más que el resto. Veamos si aunque ambos criterios indiquen zonas problemáticas, también el de Tsai-Wu dice que la pieza aguanta.



Efectivamente, vuelven a estar las mismas zonas cerca de la rotura aunque rondan el 90% del esfuerzo máximo y zonas mucho más pequeñas que antes en la que la rotura es inminente. Se aprecia muy bien en esta toma la deformada de la caja del pedalier.

Lámina 2

A priori, se espera que las zonas que antes estaban en el límite de la rotura se hayan descargado un poco. Esta vez la escala cromática sigue siendo igual que antes, con el color azul como valor mínimo y aceptable y el morado como límite.



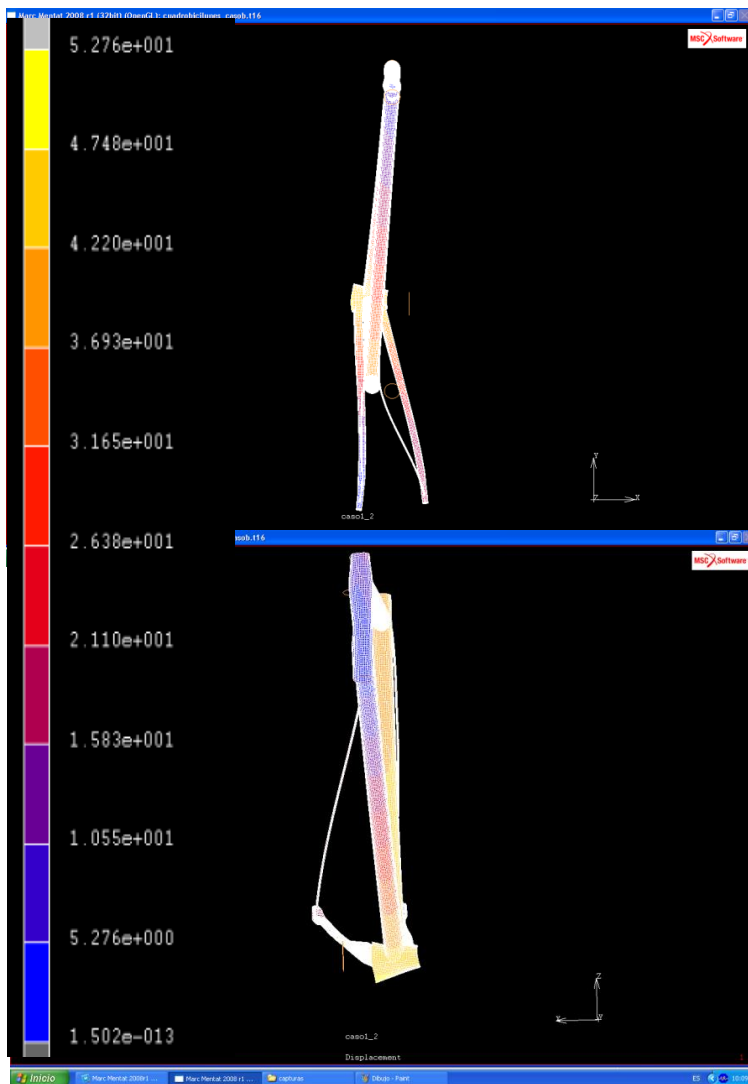
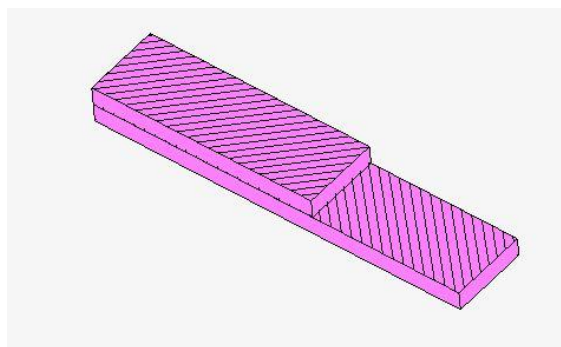
Como se había predicho, las zonas anteriormente más cargadas, se ven algo aliviadas en esta segunda lámina aunque no lo suficiente. Tras analizar estas partes conflictivas, hay que destacar que en la zona de la unión de las vainas también existen problemas. Por ello, se cambia la orientación de las láminas, que no el espesor total del laminado, para ver qué efectos conlleva.

2.5.3.4 Estudio 2

En este caso, se va a reorientar el laminado de forma que sus capas ahora estén dispuestas tal que así : $[45/-45]$. Se pretende comparar este resultado con el anterior con el fin de observar una mejora o un empeoramiento. Se elige este valor porque en las gráficas anteriores donde se calculaban las Q del material, 45° era favorable en muchos casos.

El laminado presentaría el aspecto de la imagen de la derecha. De nuevo cada capa posee el 50% del espesor total.

Analizando las imágenes de las deformadas, obtenemos los siguientes datos:



Se aprecia que la escala ampliada, que el máximo desplazamiento es de 47 mm. Es casi el doble que en el anterior caso por lo que desde ya se puede deducir que la orientación elegida no mejora sino que empeora notablemente el comportamiento frente a las acciones exteriores.

Aun así, se va a analizar en qué puntos falla el composite para poder realizar posteriormente una comparación completa con los demás casos. El hecho de mayor interés es saber cómo se comportarán dos capas opuestas entre ellas 90° y si se repartirán las tensiones con algún comportamiento predeterminado.

CRITERIO DE MAXIMA TENSION PRINCIPAL

Lámina 1

Los resultados que da el programa resultan sorprendentes. El hecho de variar la orientación, ha relajado algunas de las tensiones aunque haya aumentado los desplazamientos. Este comportamiento podría ser útil aunque en este caso interesa que los desplazamientos sean pequeños. De nuevo, en estas imágenes, la escala fluctúa de 0 a 1 siendo el color azul el valor mínimo y el amarillo el máximo.

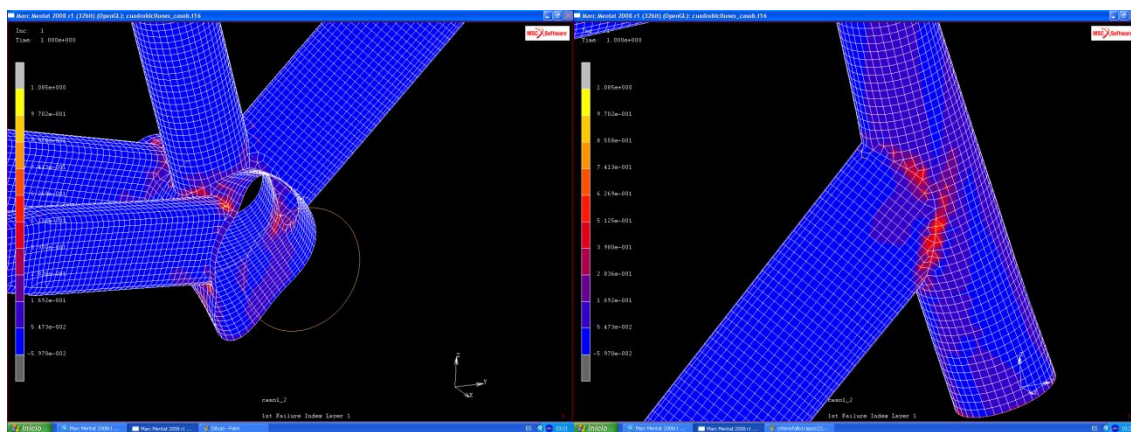
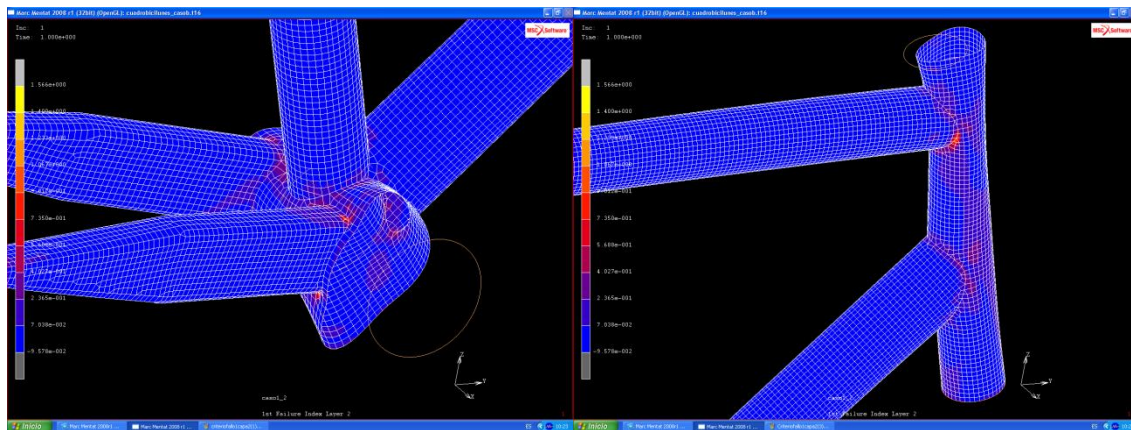


Lámina 2

Tal y como era de esperar, esta lámina se encuentra menos cargada que la anterior en los mismos puntos críticos. Por un lado las zonas cercanas a las críticas tienden a repartirse más la tensión y por otro las que antes estaban cargadas ahora lo están menos.



CRITERIO DE TSAI-WU

Otra vez este criterio marca una escala mayor por lo que los elementos que fallan, lo hacen con bastante más tensión de la admitida. El resto de las zonas concuerdan con lo visto en el primer criterio y en líneas generales indican lo mismo.

Lámina 1

La escala cromática marca el azul como el 0 y el morado como el 1. A partir de ahí los demás colores significan que no se cumple el criterio llegando a sextuplicarlo el valor máximo en amarillo. Se puede observar que solo hay una zona que no lo hace en la caja del pedalier mientras que en la barra de dirección sí que se cumple aunque alcanzando máximos de tensión admisible.

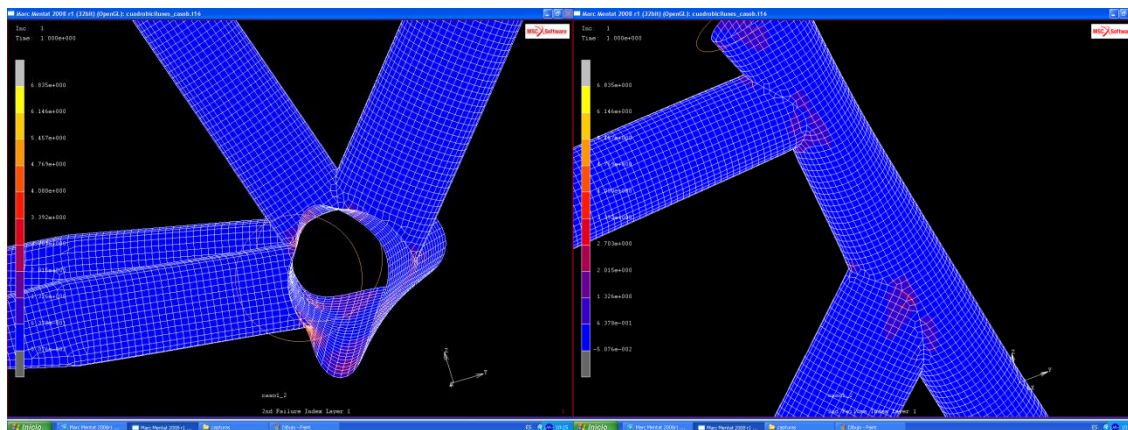
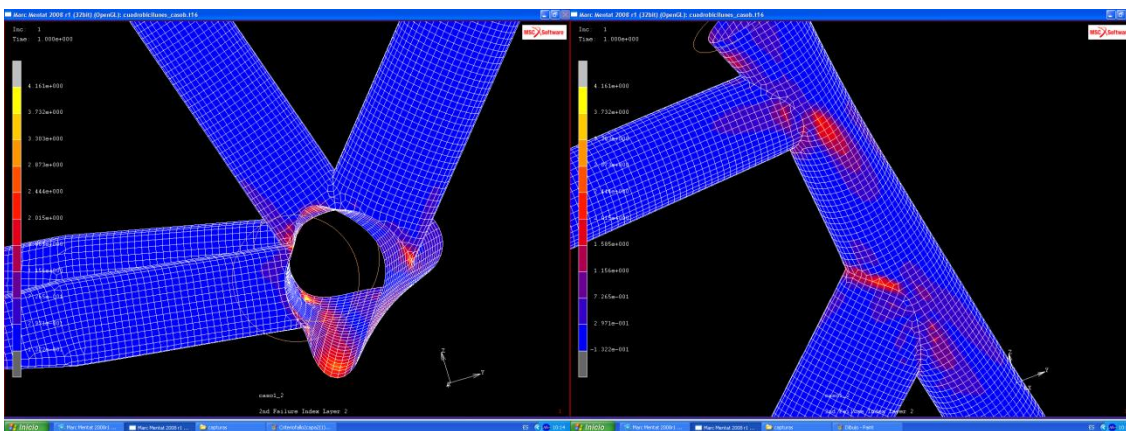


Lámina 2



Aunque parece que la segunda capa está más cargada, la imagen engaña porque en este caso la escala es menor y el color amarillo indica un valor de la mitad respecto al primer caso. Puede ser debido a que al estar a 90 grados con respecto a la primera las tensiones que absorben es diferente. Mas o menos concuerda con el primer criterio porque las tensiones máximas en la segunda capa son menores aunque haya zonas que no resistan.

En resumen, el orientar las fibras ha producido mayores desplazamientos y ha aliviado una capa mientras que la otra ha recibido más cargas. Ahora la duda que cabe es saber cómo funcionaría un composite que tuviese 4 capas combinando estas orientaciones pero sin variar el espesor total del laminado. En el siguiente estudio esas van a ser las condiciones de prueba: Un laminado del mismo espesor que los anteriores, compuesto

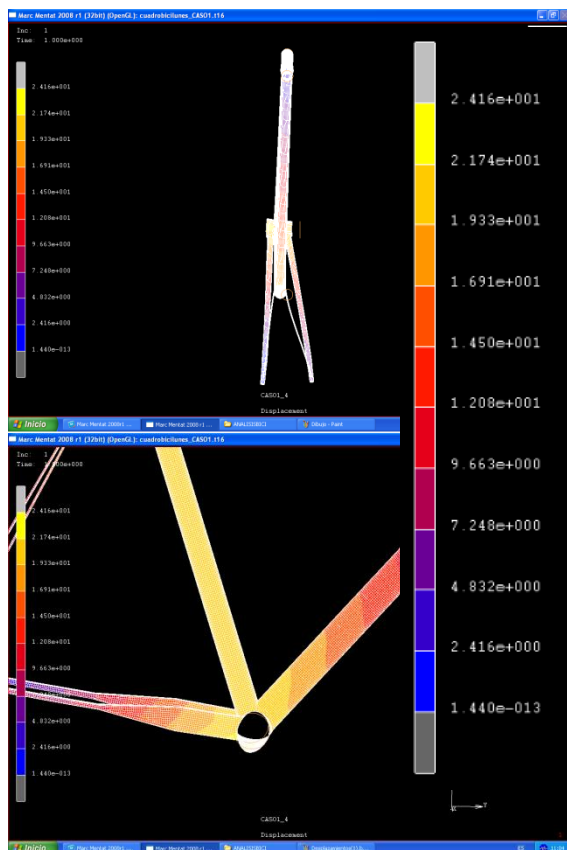
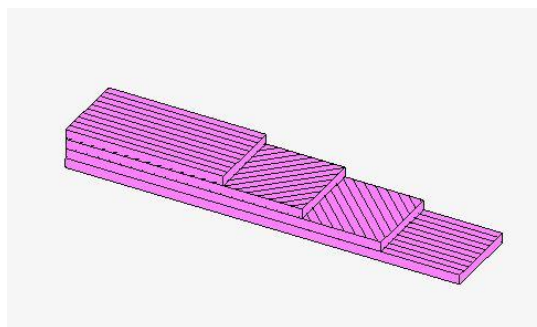
por 4 capas cuyo espesor sea el 25% del total y estén orientadas combinando las direcciones anteriores.

2.5.3.5 Estudio 3

En este caso se busca combinar la menor deformación obtenida con la orientación a 0° y el cumplimiento mejor de los criterios de fallo de las láminas orientadas a $\pm 45^\circ$. Hasta ahora se había analizado cada caso lámina a lámina mirando los distintos criterios de fallo. Como ahora se ha doblado el número, con el fin de hacer más fácil de seguir el análisis, se van a observar los puntos conflictivos todos juntos. Por haber cuatro láminas cuyo espesor es la mitad que en los casos anteriores, puede ser que se sobrecarguen más pero como ya se ha comentado, en un material compuesto el fallo de una lámina no implica el del laminado.

El laminado presenta el siguiente aspecto de la imagen de la derecha.

La deformada en este caso presenta los siguientes valores:



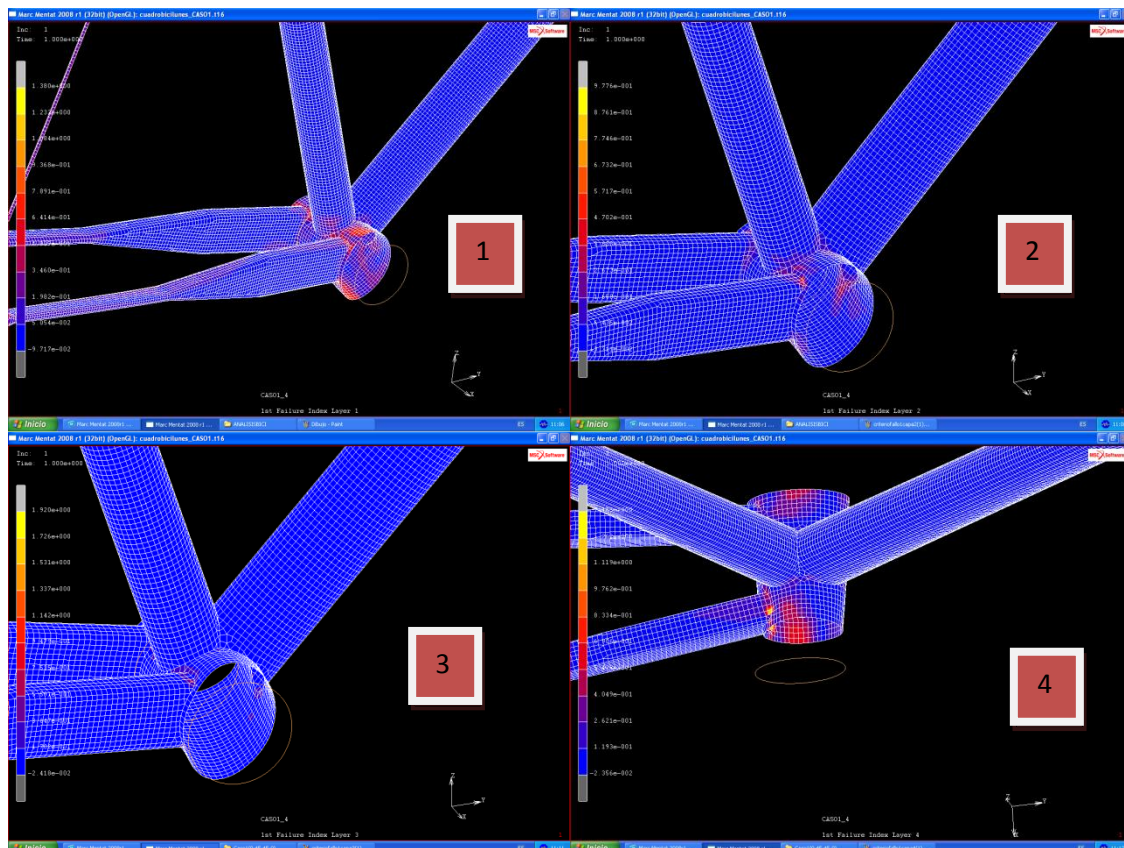
El color amarillo representa los desplazamientos máximos, que en este caso alcanzan los 21 mm. Son más pequeños que antes pero no se nota una gran mejora con respecto a los laminados formados por tan solo dos capas.

Hay una mejora significativa en la deformación de la caja del pedalier que ahora mantiene algo más la forma circular. Por lo demás, la vaina derecha sigue experimentando una deformación mayor que la izquierda y la barra de dirección parece que ha reducido su deformación. Ahora se verá cómo afecta eso a las tensiones.

CRITERIO DE MÁXIMA TENSIÓN PRINCIPAL

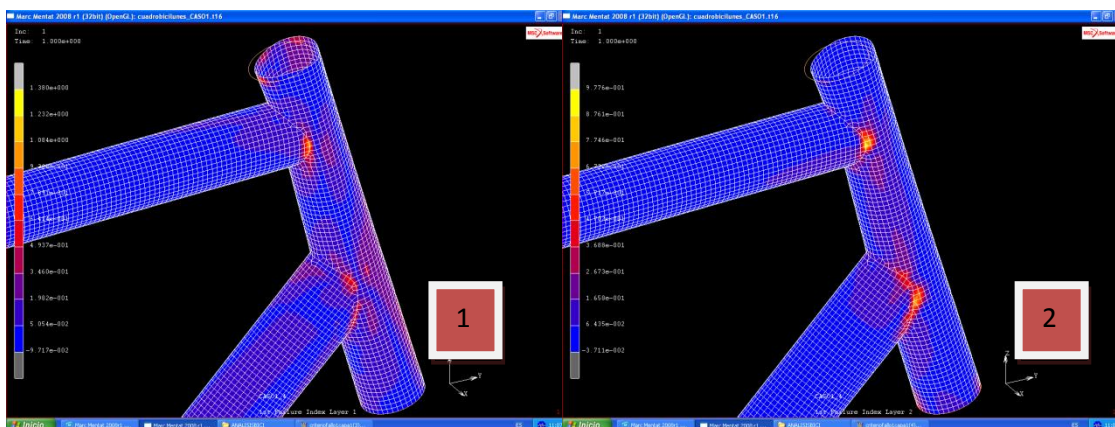
Cabe esperar que el hecho de que se haya reducido el espesor provoque unas cargas mayores en cada capa pero más igualada entre todas ellas.

A continuación se estudia la zona de la caja del pedalier que es la que más tensiones aguanta. El orden de las capas va de izquierda a derecha y de arriba a abajo.



Otra vez las capas orientadas a 0° vuelven a sufrir más tensiones que las que están a ± 45 . La escala cromática vuelve a variar de 0 a 1 siendo 0 el color azul y 1 el amarillo. Existen puntos que están en el límite en las capas 1 y 4. También se aprecia que la capa mas interna soporta menos tensiones que la primera.

Si se compara la zona de la unión de la barra de dirección con la oblicua y la horizontal vuelve a suceder lo mismo. Esta vez las láminas 2 y 3 vuelven a estar menos cargadas que la 1 y 4 aunque también hay zonas que trabajan cerca del límite. Comparando las capas 1 y 2, que al ser más exteriores están más cargadas, se puede apreciar. Las otras dos se omiten por tener igual comportamiento. La escala permanece invariable respecto al primer caso porque son los mismos análisis.

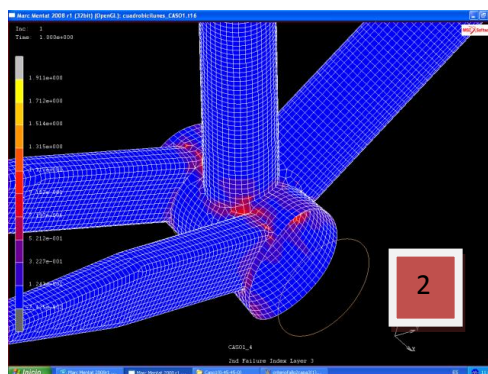
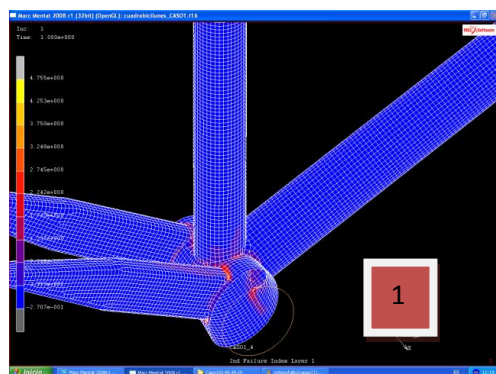


Efectivamente existen mayores tensiones en la capa con orientación 0° . Ahora falta averiguar si el segundo criterio de fallo dice lo mismo.

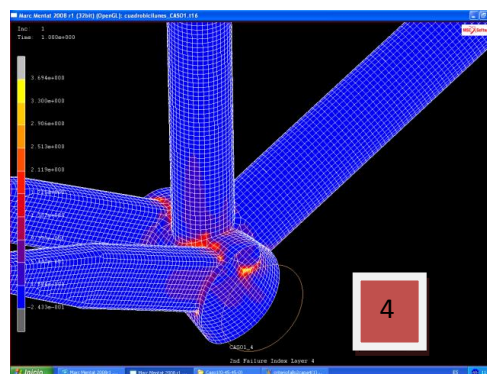
CRITERIO DE TSAI-WU

Se van a volver a comparar las mismas zonas. Con el fin de no ser repetitivos se van a omitir datos de algunas capas si se observa alguna simetría en los comportamientos.

En la zona de la caja del pedalier, se observan los mismos resultados que con el anterior criterio. La única diferencia es que el rango de la escala cromática vuelve a ser mayor de 1 pero las zonas que no cumplen son mínimas. Además en casos anteriores podía dudarse con este aspecto al haber sólo dos capas pero ahora al ser doble el número, existe una mayor fiabilidad frente al fallo de una capa.



Las tensiones en la caja del pedalier son mayores en las capas orientadas a 0° . En todos los casos se repite el mismo patrón. En las uniones de la barra de dirección ocurre exactamente igual.



Queda demostrado la influencia de la variación del ángulo de las capas. En este último caso se ha conseguido disminuir algo la deformación máxima sin variar el espesor y sólo orientando algunas capas.

2.5.3.6 Conclusiones del caso de carga 1

Se han probado tres combinaciones distintas sin variar el espesor. Han sido resultados distintos en los que se puede apreciar perfectamente la influencia del ángulo de las fibras.

Por otro lado, se demuestra que el espesor de las capas influye en su capacidad de aguantar tensiones, algo que se podía intuir cuando se hablo de la teoría de laminados. En estos casos se decidió no variar el espesor porque el siguiente de carga es más exigente y esas pruebas tienen más sentido ser realizadas en el segundo caso. Aún así, el laminado iba algo justo de resistencia en los tres casos simulados hasta ahora. Una posible solución sería la reorientación de algunos tramos conflictivos o simplemente incrementar el espesor en esas zonas.

Otra cosa algo sorprendente debido a que es la primera vez que utilizo estos materiales, ha sido el resultado al variar la orientación en el segundo estudio y encontrar que al haber mayor deformación las tensiones no se habían disparado sino que alguna zonas se habían distensionado.

Tras analizar este primer caso de carga, es turno de empezar a simular el segundo. Cabe pensar que si en este los desplazamientos y tensiones rondaban los límites, en el siguiente caso que casi multiplica por diez la potencia vayan a producirse resultados desmesurados. Por ello, se introducirá alguna novedad como variar espesores manteniendo los ángulos de las láminas.

2.5.4 Caso de carga 2

En esta situación, todo lo que se parezca a los datos obtenidos en el primer caso, será fruto de la casualidad. Precisamente, en el gran incremento de las acciones exteriores está la riqueza del análisis. Se van a simular los mismos casos para poder comparar los desplazamientos y entender los resultados finales cuando se realicen ensayos con mayores espesores.

Ya se ha explicado en la parte anterior de cálculo de las acciones exteriores que se aplicaba un coeficiente de mayoración igual a 2 sobre el peso del ciclista y sobre su potencia. Por eso, en este caso los datos de partida eran:

- Potencia: 2400W
- Peso del ciclista 180 Kg
- Porcentaje de peso: tubo del sillín-50% tubo de dirección.

Que una vez tratados, se transformaban en las siguientes cargas directas sobre el cuadro:

- Fuerza sobre los nodos de la barra de dirección: 22.07 N/nodo
- Presiones en caja del pedalier:

$$P_{R_1} = 5.60 \text{ Mpa}$$

$$P_{R_2} = 0.718 \text{ Mpa}$$

$$P_{R'_1} = 2.14 \text{ Mpa}$$

$$P_{R'_2} = 0.274 \text{ Mpa}$$

- Presiones en las vainas

$$P_{R_3} = 23 \text{ Mpa}$$

$$P_{R_4} = 4.19 \text{ Mpa}$$

2.5.4.1 Espesor de los tubos inicial

Las primeras simulaciones se van a realizar con los mismos espesores de antes. Más adelante cambiarán y ya se reescribirán las medidas.

- Tubo de dirección: 0.4 mm
- Tubo horizontal: 0.6 mm
- Tubo oblicuo o diagonal: 0.6 mm
- Tubo del sillín: 0.7 mm
- Caja del pedalier: 0.5 mm
- Vainas superiores: 0.4 mm
- Vainas inferiores: 0.4 mm

2.5.4.2 Estudio 4

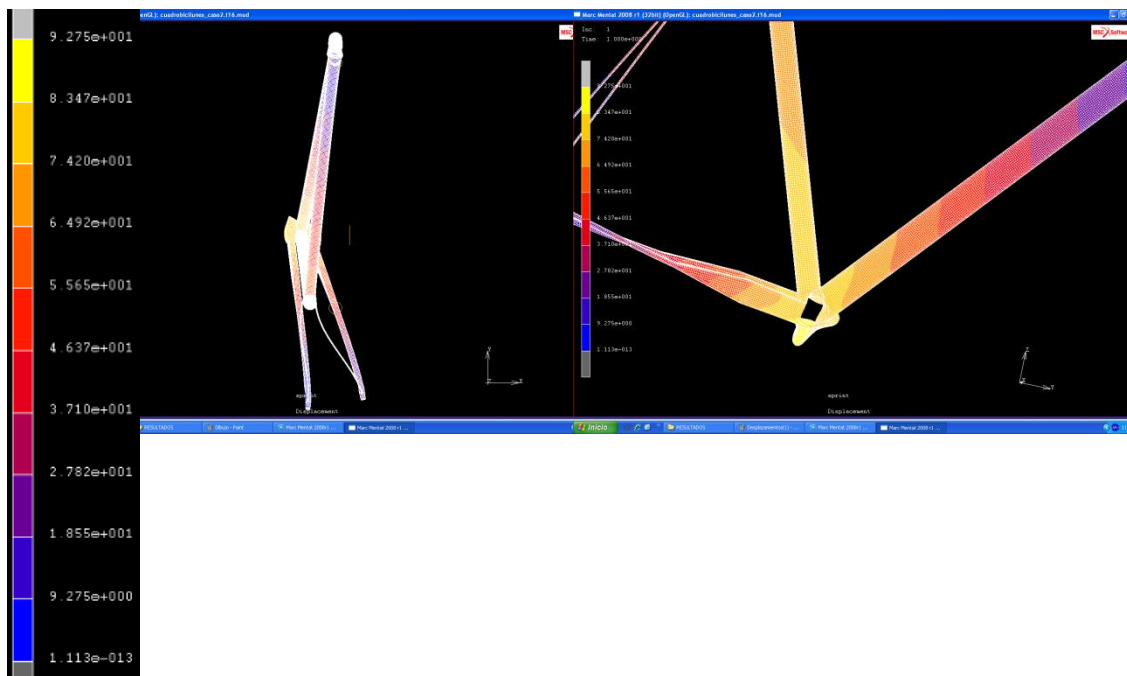
En este caso se parte de la misma base que en el caso de carga 1. Se va a analizar el mismo laminado de dos capas a 0°. Ya se sabe que no va a aguantar porque en el caso anterior estaba bastante ajustado el criterio de fallo y ahora se aplica una potencia diez veces mayor.

Lo interesante de estos análisis es ver cómo sería la deformada con respecto a los casos anteriores para ver si sigue alguna relación lineal o cómo funciona. Es de esperar que aunque el ordenador dibuje una deformada el cuadro haya partido por esa zona antes.

Más adelante se estudiará el laminado combinado con láminas a 0° y 45° pero es probable que también pase dificultades para soportar los esfuerzos.

Las imágenes siguientes muestran las deformadas de los laminados en estudio:

Laminado $[0^\circ/0^\circ]$



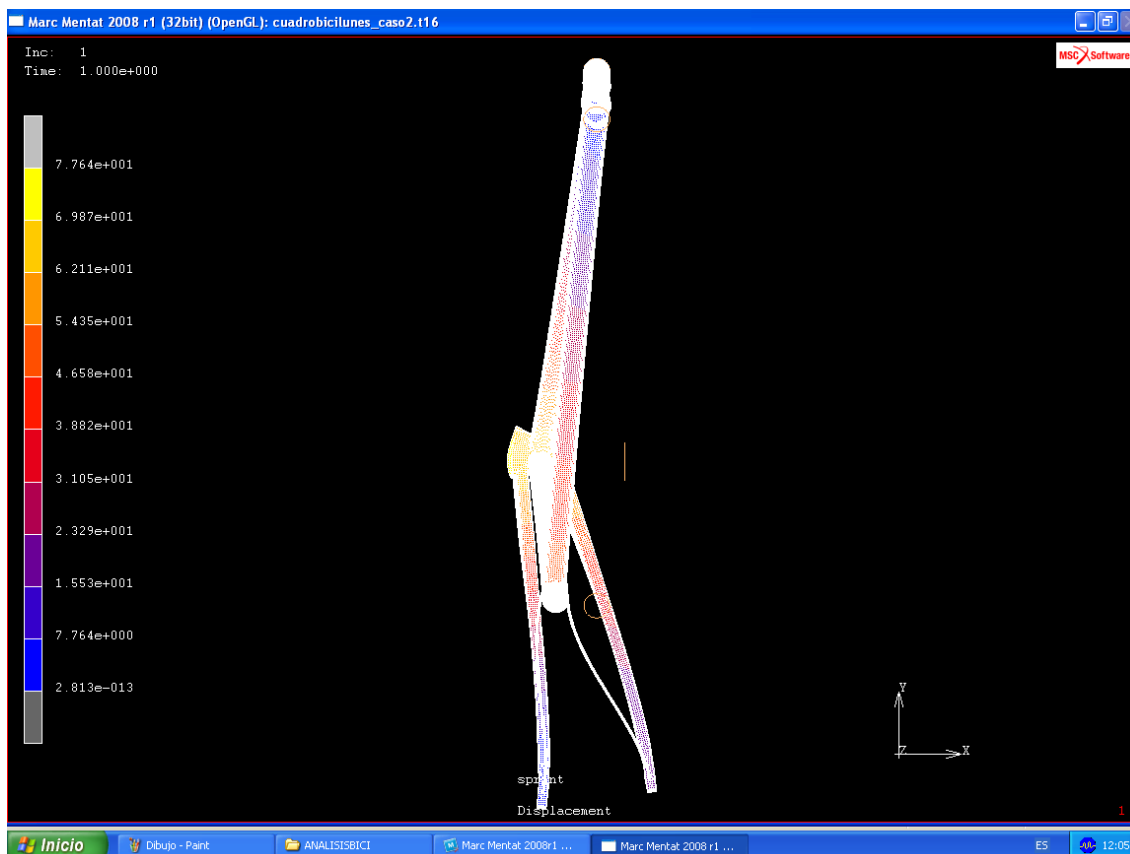
Se puede observar que el desplazamiento máximo es de 83 mm. Tiene lugar en la caja del pedalier que además de estar totalmente desfigurada, dobla el cuadro más que notablemente. Lógicamente en este punto si no se ha roto, cerca estará. Como en casos anteriores con deformaciones de 20 mm ya se alcanzaban picos altos de tensión, se da por hecho que en estos también por lo que no se van a mirar los criterios de fallo.

2.5.4.3 Estudio 5

Dentro de todos los estudios realizados hasta el momento, este es el que mayor importancia tiene. Se va a analizar el laminado primitivo de cuatro capas bajo estas nuevas acciones y se va a comprobar su comportamiento. Después se va a tratar de corregir el desplazamiento hasta unos valores más aceptables cambiando el espesor de los tubos del cuadro. Aún así, con el fin de asegurar y cerciorarse de que nos hallamos en un punto en el que un aumento del espesor no significa una disminución de los desplazamientos, se reforzarán los puntos críticos, es decir, la caja del pedalier y el tubo de dirección.

Como ya se ha comentado anteriormente, el objeto de este estudio es analizar la relación entre el espesor de los laminados y sus orientaciones con las tensiones y deformaciones producidas sobre el cuadro.

Visto el comportamiento del laminado $[0^\circ/0^\circ]$ cabe esperar que el $[0/45^\circ/-45^\circ/0]$ no esté muy alejado porque el espesor es igual. En la siguiente imagen se muestran los desplazamientos del laminado



Sólo con ver esta imagen se aprecia que no hay grandes diferencias con el caso anterior. El laminado se deforma un máximo de 70 mm por la parte de la caja del pedalier. Este valor es aproximadamente un 10% menor que el anterior pero sigue siendo inadmisibles. La solución ante este problema no es posible obtenerla mediante un reorientado. Ahora es necesario ver la influencia que tiene el aumento del espesor.

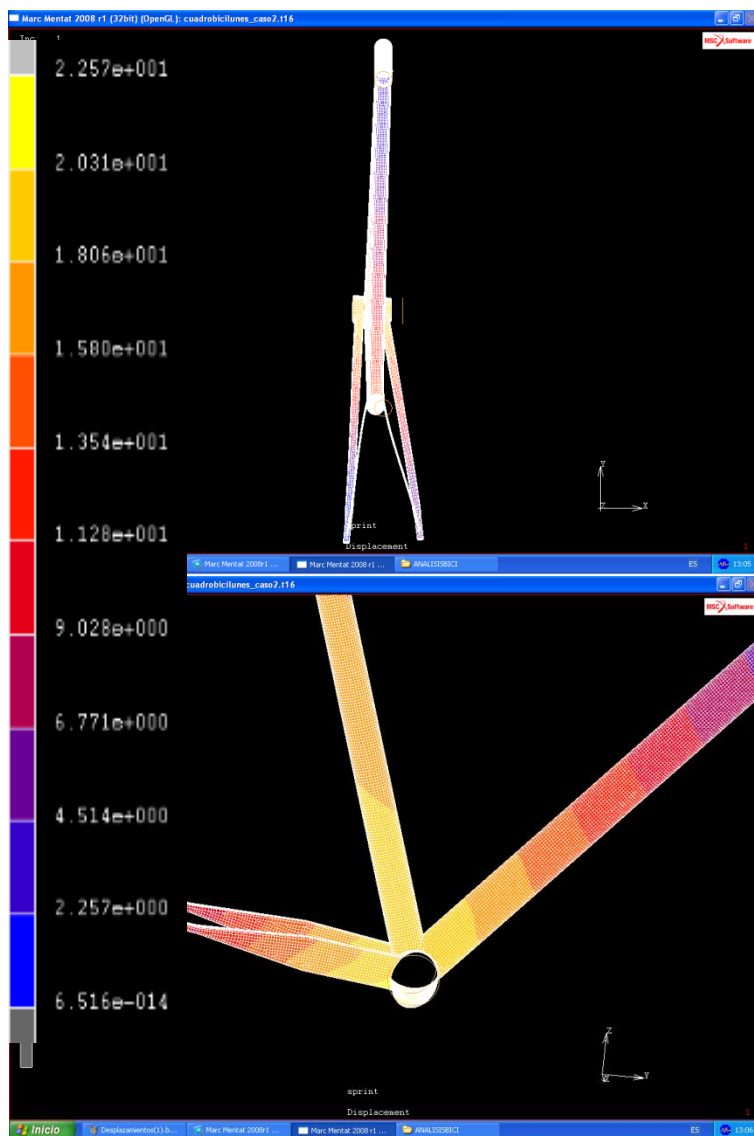
Debido a que la deformación es excesiva, se va a doblar el espesor para comprobar qué ocurre. Los nuevos espesores tienen el siguiente valor:

- Tubo de dirección: 0.8 mm
- Tubo horizontal: 1.2 mm
- Tubo oblicuo o diagonal: 1.2 mm
- Tubo del sillín: 1.4 mm
- Caja del pedalier: 1 mm
- Vainas superiores: 0.8 mm
- Vainas inferiores: 0.8 mm

Más adelante si con estos nuevos espesores la pieza sigue sufriendo deformaciones mejorables en determinadas zona, se añadirá un refuerzo a nivel local para controlarlas.

Así pues, el laminado $[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/0]$ tiene ahora el doble de espesor y sus capas siguen teniendo cada una el 25% del total.

Los datos de deformación obtenidos con Marc para este nuevo caso son los siguientes:



El valor máximo apenas alcanza los 25 mm en la zona de la caja del pedalier. Ahora sí es posible afirmar que la deformación se ha reducido drásticamente tras doblar el espesor.

Con esto se demuestra que aunque la orientación es crucial, el aumento del espesor también tiene una importancia más que relevante.

Este resultado puede dar pie a intentar aumentar el espesor antes que variar las orientaciones para ver si se pueden ajustar los desplazamientos. Es más sencillo pero no es la mejor idea ya que esto puede suponer un encarecimiento del producto bastante notable.

Se aprecia también que la deformación en la forma final de la caja del pedalier se ha visto reducida en una gran mayoría y ahora guarda más similitud con su forma inicial, cilíndrica, que en los casos anteriores.

Tras este aumento de espesor, como es lógico, también lo ha hecho la masa del cuadro. Ahora el total asciende a 500g. Sigue siendo un valor más que aceptable ya que si se deduce el volumen sabiendo su densidad y su masa, este tiene un valor de

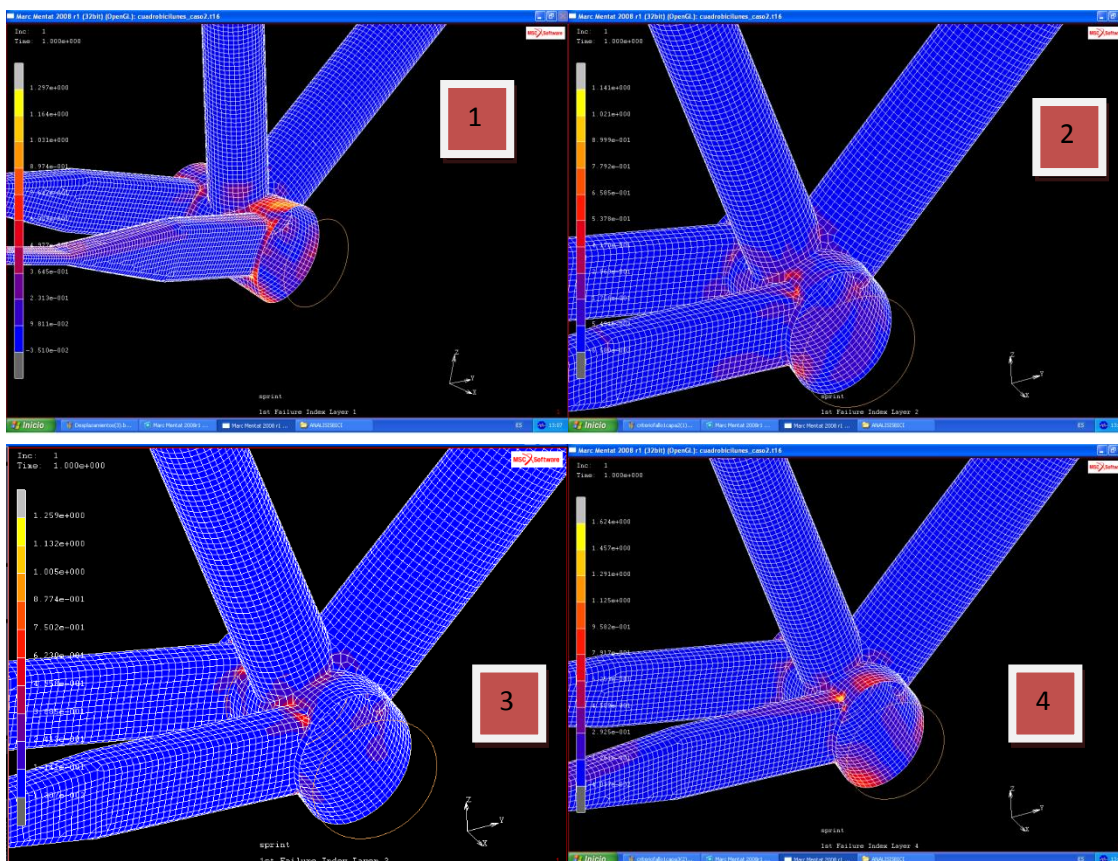
$2.857 \times 10^{-4} m^3$. Si el cuadro estuviese compuesto de acero, cuya densidad es $2700 \frac{Kg}{m^3}$ su masa sería 771g. Pero como con este espesor de tubo el otro cuadro no tendría la resistencia necesaria, aun aumentaría bastante más el valor.

Si analizamos los criterios de fallo en los ya conocidos puntos críticos obtenemos los siguientes resultados:

CRITERIO DE MAXIMA TENSION PRINCIPAL

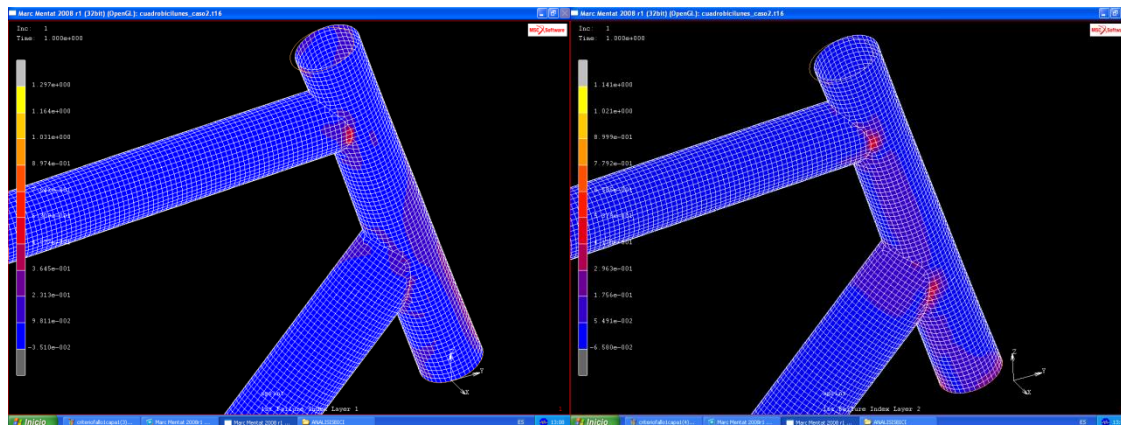
En la zona de la caja del pedalier, el criterio muestra lo siguiente:

La escala cromática va de 0 a 1 siendo el color azul el 0 y el 1 el amarillo. Los resultados son muy similares a los que ya se conocían en anteriores casos. Las capas orientadas a 0° sufren más que las que están a 45° . Ahora se observa como casi todos los puntos cumplen el criterio y hay muy pocos que no. Eso sí, las capas vuelven a estar trabajando cerca de su máximo en alguna zona concreta.



Más adelante, se reforzará el espesor de sólo la caja y probablemente el estado tensional mejore y la deformación sea menor. De todas formas, hay que buscar un punto en el que por mucho que se aumente el espesor, la deformación no disminuya de la misma forma.

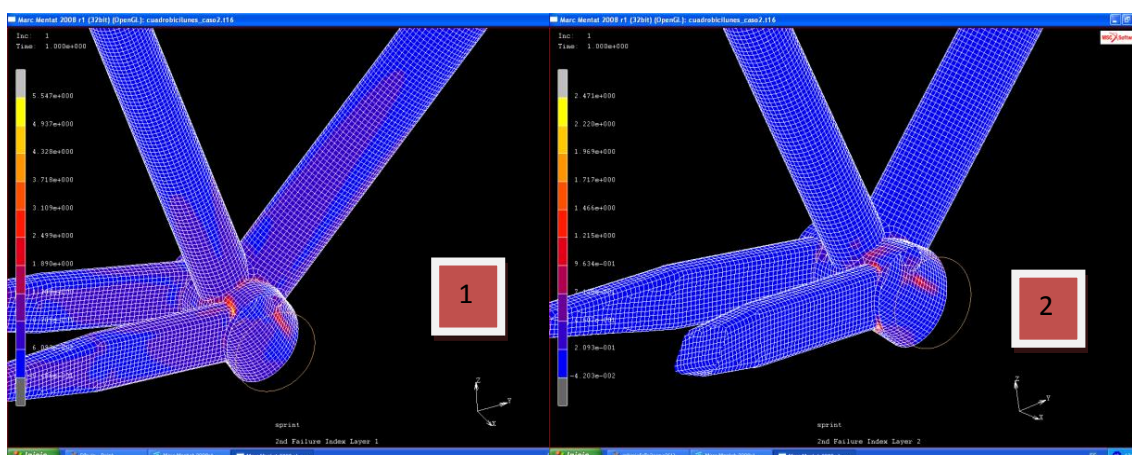
La otra zona conflictiva era el tubo de dirección. Aunque no presentaba tanta deformación como la caja del pedalier, sí que sufría en ciertos puntos importantes. Es interesante ver las capas que más sufrían, cómo han mejorado. Estas eran las más exteriores, es decir la 1 y 2, orientadas a 0° y 45° respectivamente.

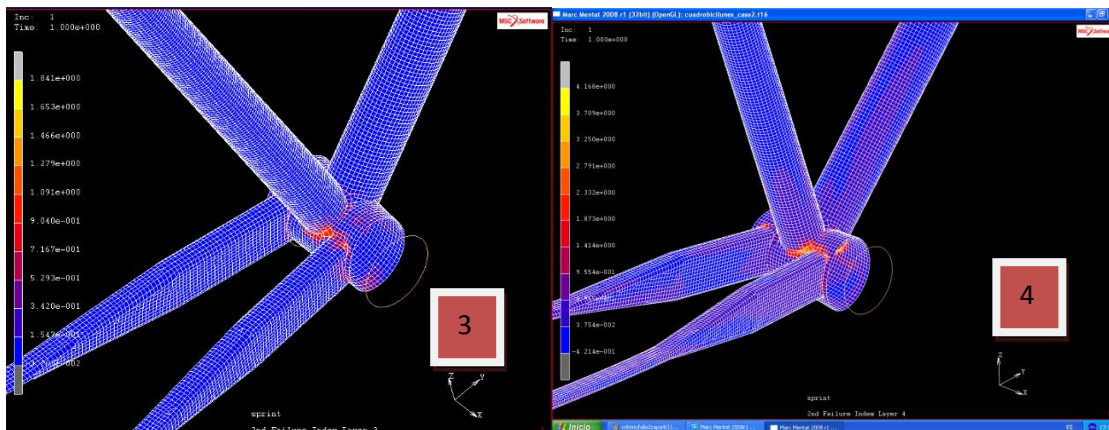


En comparación con los casos anteriores, ha mejorado drásticamente el comportamiento de esta zona. Ahora ya casi no existen zonas conflictivas aunque habrá que corroborarlo con el segundo criterio de fallo que es más exacto y aporta información más visual.

CRITERIO DE TSAI-WU

Gracias a la mayor exactitud que aporta este criterio, se van a estudiar las posibles soluciones para conseguir disminuir el desplazamiento máximo de algunas zonas del cuadro. En la caja del pedalier, obtenemos los siguientes resultados:





Como ya se conocía, las capas 1 y 4 son las más cargadas con diferencia. El refuerzo en esta zona sería lógico aplicarlo solo a esas capas pero recordando casos anteriores las que mayor deformación sufrían eran las de $\pm 45^\circ$ por lo que la decisión final es reforzar todas por igual, doblando su espesor.

2.5.4.4 SOLUCION FINAL

Después de analizar los anteriores casos y observar dónde se concentraban las tensiones una vez aumentado el espesor, y por ende los problemas en el diseño, se ha decidido duplicar el espesor de las zonas conflictivas. Esta medida proporciona la resistencia adecuada frente a unas acciones exteriores ya calculadas y asegura que el cuadro no vaya a romperse salvo que se produzca un impacto severo o alguna acción fuera del alcance de los cálculos realizados.

Además, como ya se mencionó anteriormente, el cálculo se ha realizado en base a unas simplificaciones sobre el diseño inicial. Los espesores siguen siendo válidos para los tubos que se han diseñado y además hay ciertos bordes redondeados que no se han tenido en cuenta y que al introducirlos van a actuar como distensadores en las zonas problemáticas.

Aunque la zona más crítica es la caja del pedalier, también se refuerza el tubo de dirección ya que al hacer más rígida una parte del cuadro puede que las tensiones se desplacen hacia otra zona y como esa está bastante cargada, por seguridad se le dobla también el espesor. Ahora la masa del cuadro total es de 536g. Es un aumento poco significativo para el aumento de prestaciones obtenido por lo que considero que merece la pena. El área total contando cada capa equivale aproximadamente a $1,2 \text{ m}^2$.

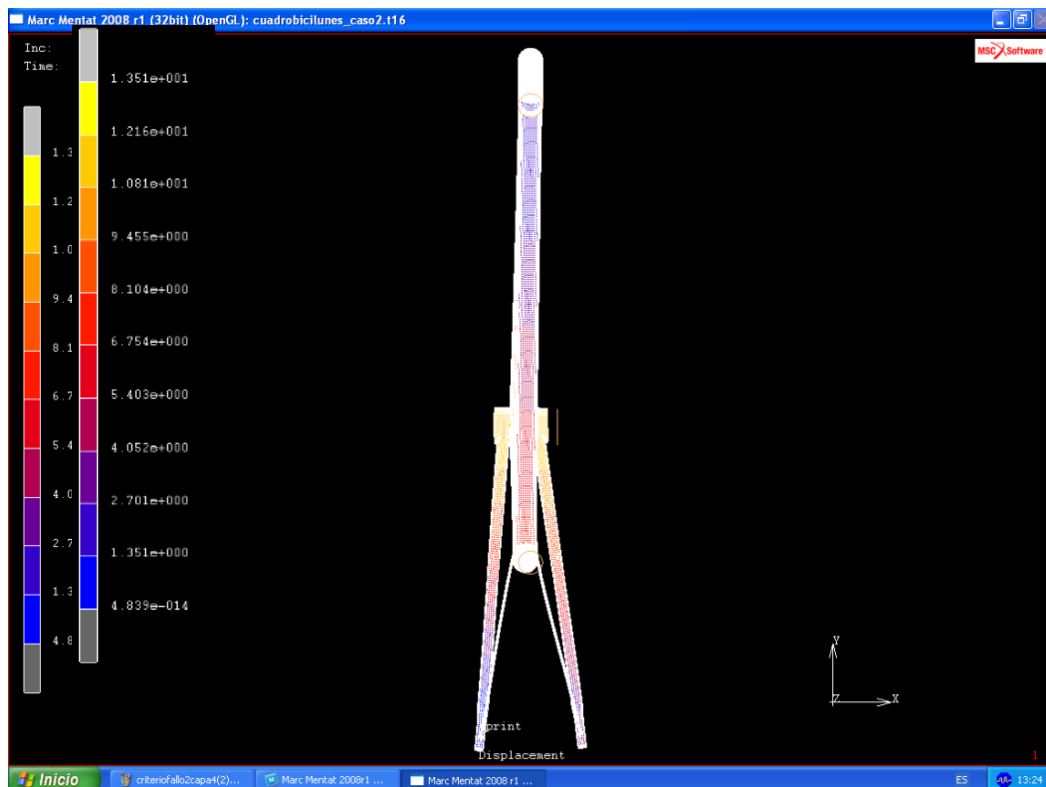
Por lo tanto, los nuevos espesores en el cuadro quedan de la siguiente forma:

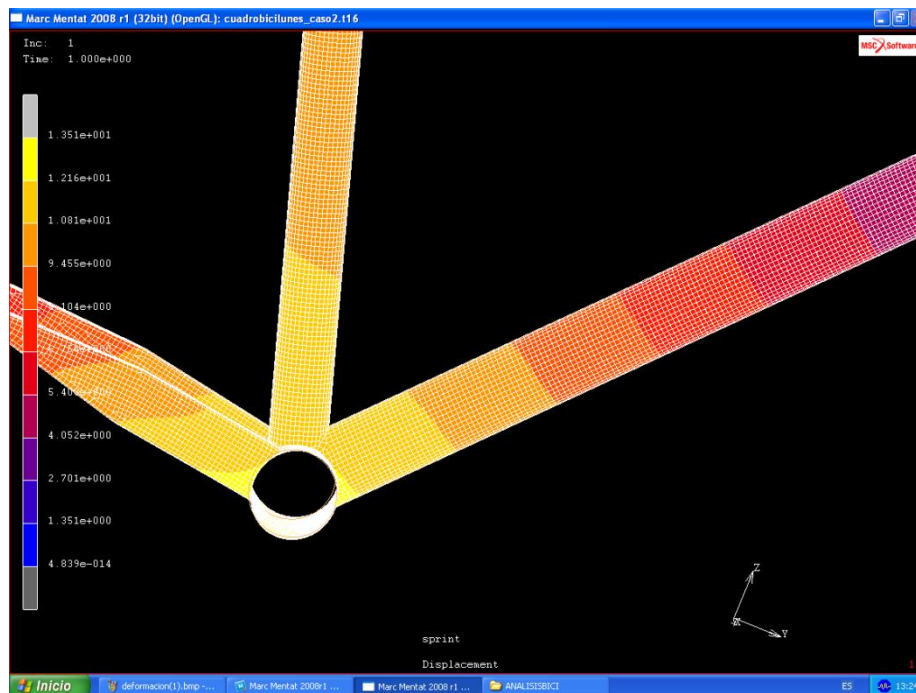
- **Tubo de dirección: 1.6 mm**
- Tubo horizontal: 1.2 mm
- Tubo oblicuo o diagonal: 1.2 mm
- Tubo del sillín: 1.4 mm

- **Caja del pedalier: 2 mm**
- Vainas superiores: 0.8 mm
- Vainas inferiores: 0.8 mm

Esta vez para analizar la solución final sólo se van a utilizar los desplazamientos. Como en el caso anterior ya cumplía los criterios de fallo, esta vez sólo se va a comprobar con el de Tsai-Wu por su mayor exactitud. Es interesante ver si se ha conseguido disminuir el valor máximo de desplazamiento y cómo afecta el aumento de espesor parcial a la redistribución de las tensiones.

Los desplazamientos quedan de la siguiente manera:





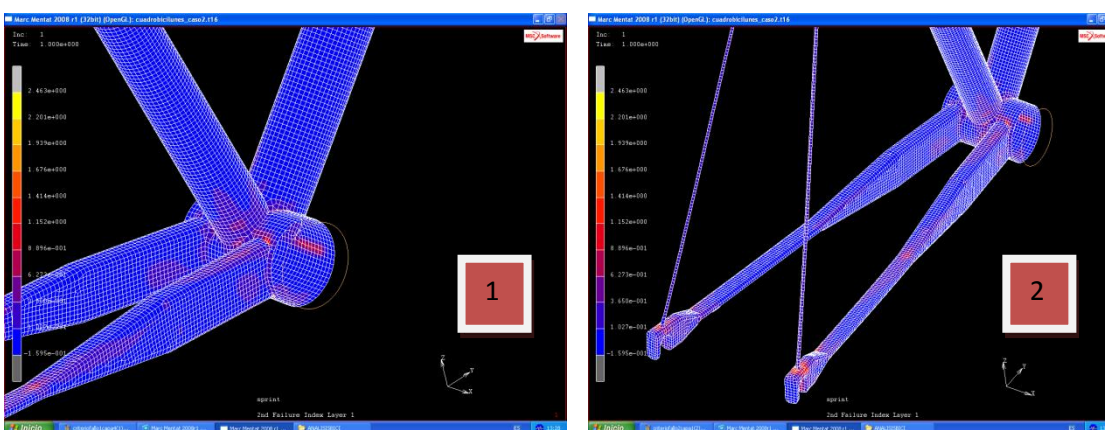
Con el aumento de espesor en las zonas propuestas, se ha conseguido reducir en un 50% el valor en milímetros de la deformación máxima. Es un avance muy bueno y ahora sí que está en los límites de lo razonable.

Observando la deformada de la caja del pedalier, salta a la vista que ya conserva su forma inicial y que no existen indicios de que adopte formas extrañas.

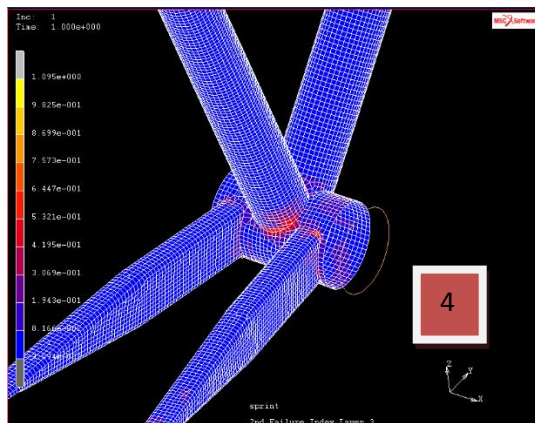
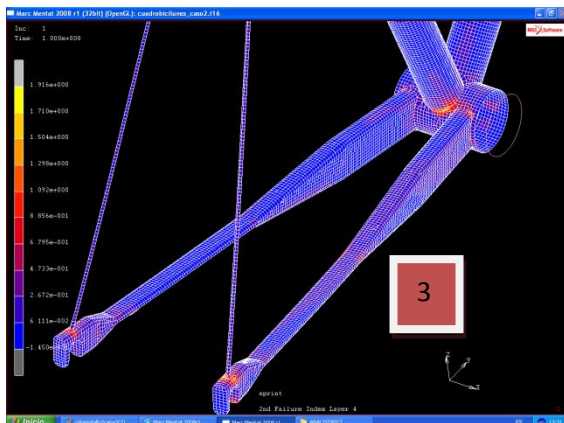
A priori, se puede afirmar que la decisión de aumentar el espesor ha sido acertada. Para comprobarlo con exactitud se van a analizar varias zonas con el criterio de Tsai-Wu. Esta vez, la escala cromática es más reducida y en vez de llegar a 6 llega hasta 2,3. Para el análisis, el 0 es el color azul y el 1 el color rojo.

Caja del pedalier:

Es visible como en la capa a 0 ° las tensiones ya no alcanzan valores tan grandes. Ahora están más repartidas por la vaina pero sin alcanzar valores de rotura e incluso trabajando al 50% de su capacidad total aproximadamente.

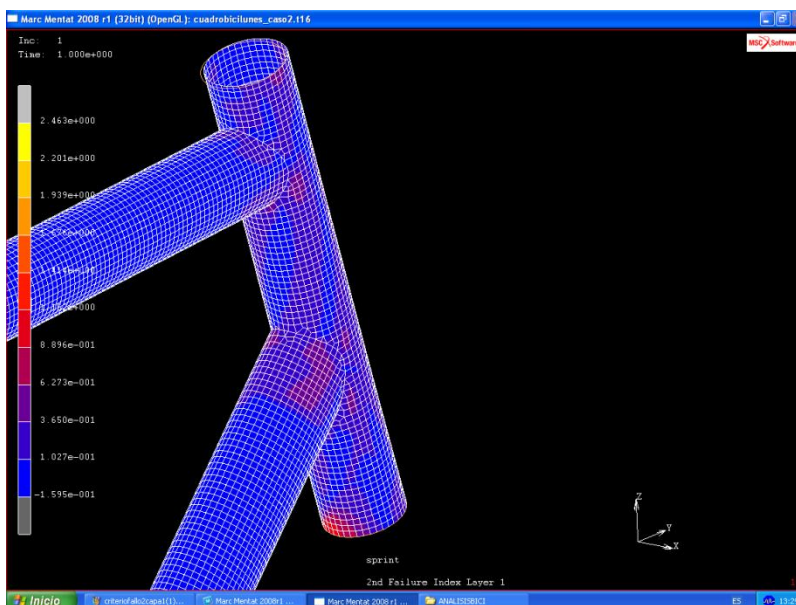


En el resto de las láminas sucede lo mismo:



Lo más sorprendente es que en la lámina 3, la escala cromática va de 0 hasta 1 solamente por lo que está trabajando en unos niveles óptimos ya que ningún punto de esa lámina sobrepasa sus límites. En la 4 ocurre igual que en la 1 y la 2 pero otra vez se vuelven a encontrar puntos que trabajan al máximo.

Por otra parte analizando el otro tubo reforzado obtenemos los siguientes datos en sus capa más problemática, la número 1.



Esta vez no existen zonas donde se superen los límites por lo que la pieza cumple su función sin ningún problema o impedimento.

2.5.5 Conclusiones de los análisis

Estos estudios por medio del método de los elementos finitos han servido demostrar y aprender varias cosas sobre los materiales compuestos:

1. **La importancia de la orientación de las fibras:** En el primer caso de carga, se obtuvieron diferentes resultados, y con una gran variación entre ellos. Todo debido a la diferente orientación. La lección que se obtiene sirve para ver que en según qué casos donde no se pueda variar el espesor, una orientación correcta puede hacer que un diseño funcione o no.
2. **Una mayor deformación no implica mayores tensiones:** Los materiales que no son isótropos, presentan diferentes propiedades mecánicas según su dirección. En el estudio 2 del caso 1 se pudo observar que al cambiar la orientación de las capas, el material presentaba una deformada mayor pero habían sufrido un alivio de las tensiones sus láminas. Este conocimiento también puede ser utilizado en un diseño con unos amplios márgenes de desplazamiento en los que a lo mejor interese aumentar la durabilidad del compuesto sometiéndolo a menores tensiones.
3. **La importancia del espesor:** Con el planteamiento del caso 2, ha sido necesario variar el espesor de los tubos con el fin de obtener menos desplazamientos. Es decir, un mayor espesor puede conseguir que se produzcan menores deformaciones. Gracias a la baja densidad de estos materiales, comparados con otros que se usan frecuentemente, se pueden obtener productos ligeros y con una resistencia muy buena. Si en vez de haber sido fibra de carbono el material usado, hubiese sido aluminio, el hecho de doblar el espesor hubiese supuesto un problema.
4. **Fallos en láminas y laminados:** Otra propiedad para decantarse por el uso de estos materiales es su forma de fallar. Diversas pruebas realizadas han demostrado que aunque una lámina falle el laminado puede seguir funcionando perfectamente mediante una redistribución de las tensiones en las capas intactas. En el caso de este estudio, había capas que estaban rozando el límite o sobrepasándolo en algunos puntos pero como las que estaban alrededor suya no estaban al máximo, podía aceptarse la hipótesis como válida y dar por bueno el diseño.
5. **Criterios de fallo:** Con la resolución de estos casos ha quedado demostrado que el criterio de Tsai-Wu tiene una gran precisión y que aunque con el de máxima tensión se pueden obtener resultados válidos, Tsai-Wu aporta una mayor cantidad de información muy valiosa porque con estos materiales cualquier mínimo detalle es válido para aprovecharlo y obtener grandes mejoras.

En definitiva, ha quedado latente la gran versatilidad de diseño que ofrecen estos materiales. Desde un punto de vista general, su uso crece cada día y se van obteniendo nuevas formas de producción que abaratan sus costes. No solo tienen cabida en el mundo de la competición sino que su rango de utilidad va desde objetos del día a día hasta los utilizados en el desarrollo de la exploración espacial.

2.6 RESULTADO FINAL Y SOLUCION ELEGIDA

Tras todos los cálculos y análisis realizados, la decisión final es diseñar el cuadro con los espesores del último análisis, es decir:

- **Tubo de dirección: 1.6 mm**
- Tubo horizontal: 1.2 mm
- Tubo oblicuo o diagonal: 1.2 mm
- Tubo del sillín: 1.4 mm
- **Caja del pedalier: 2 mm**
- Vainas superiores: 0.8 mm
- Vainas inferiores: 0.8 mm

Todos los espesores están compuestos por cuatro capas con una disposición entre ellas tal que $[0/45^\circ/-45^\circ/0]$. El espesor relativo de cada una de las láminas es el 25% del total del espesor de ese tubo. Con esta configuración el peso final del cuadro es de 532 g. Aguanta perfectamente los esfuerzos para los que ha sido pensada y combina esta gran resistencia con el bajo peso que la fibra de carbono tiene.

Pamplona, a 17 de Febrero de 2014
Alberto Solana Rodríguez
Ingeniero Técnico Industrial Mecánico



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación :

INGENIERO TÉCNICO INDUSTRIAL MECÁNICO

Título del proyecto:

CUADRO DE BICICLETA EN MATERIAL COMPUESTO

DOCUMENTO N°3 PLANOS

Alberto Solana Rodríguez

Vanesa Estremera Carrera

Pamplona, 17 de febrero de 2014

ÍNDICE

PLANOS

3.1 VISTA ISOMÉTRICA

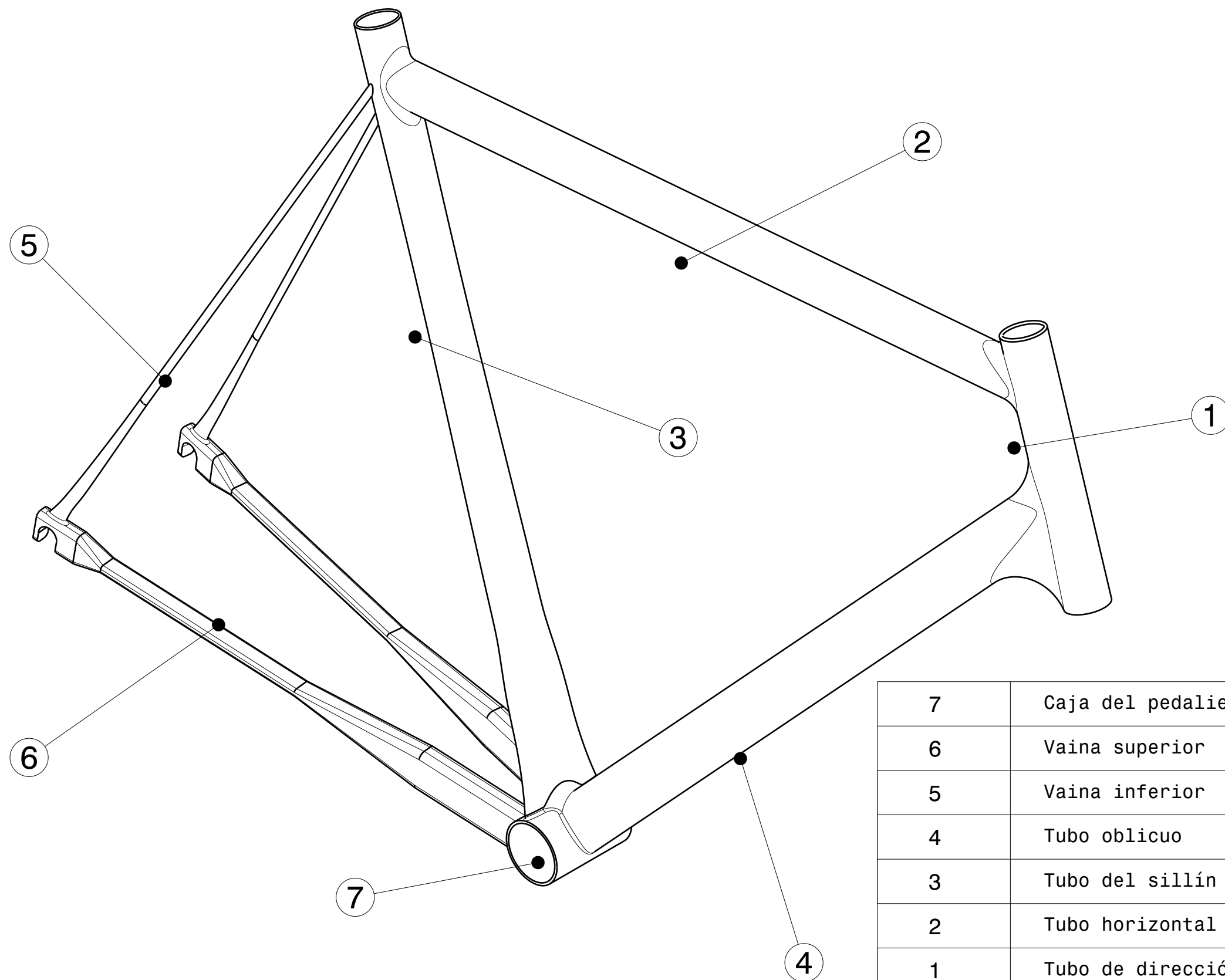
3.2 ALZADO

3.3 PLANTA

3.4 CORTES ALZADO

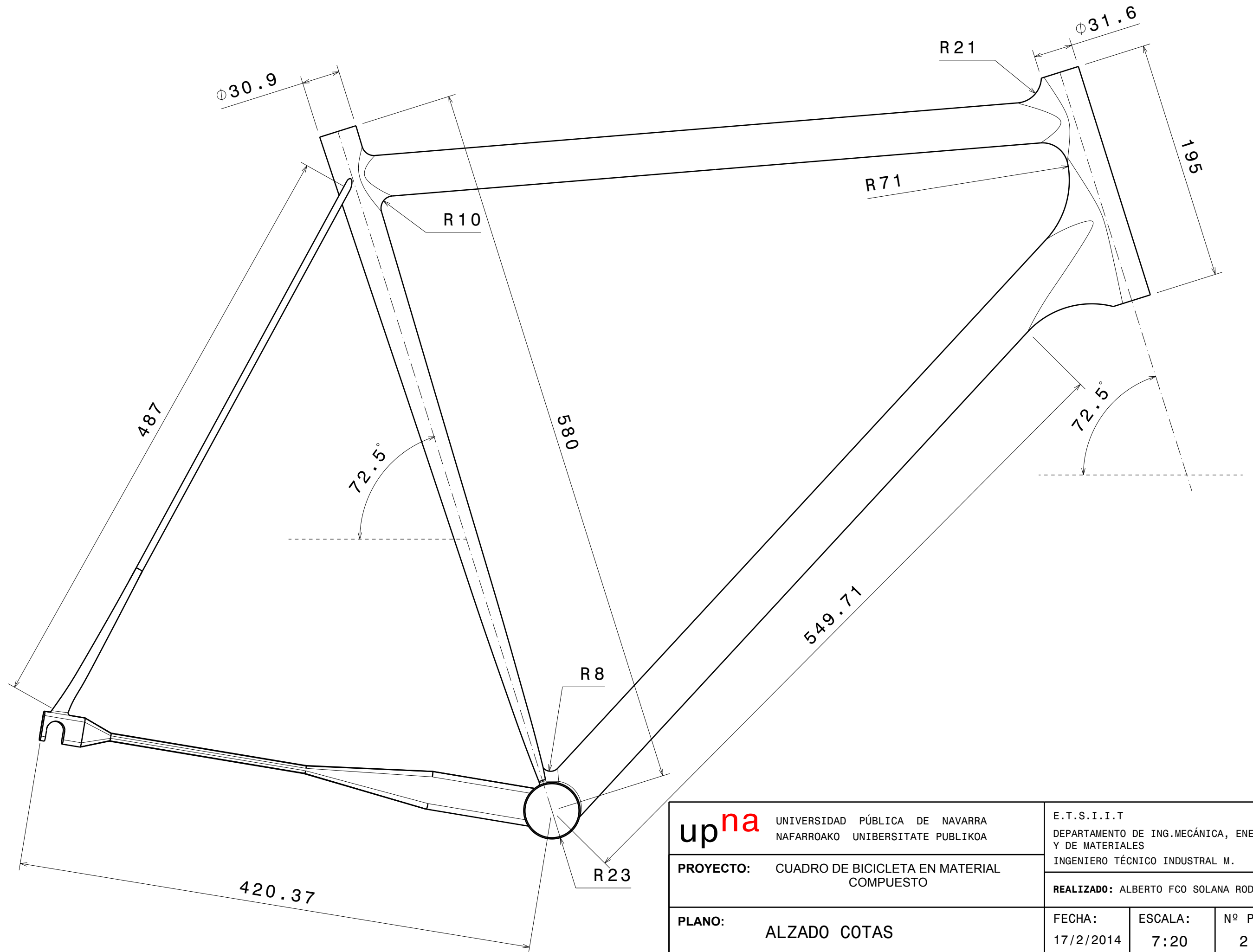
3.5 ALZADO VAINA INFERIOR

3.6 CORTE VAINA INFERIOR

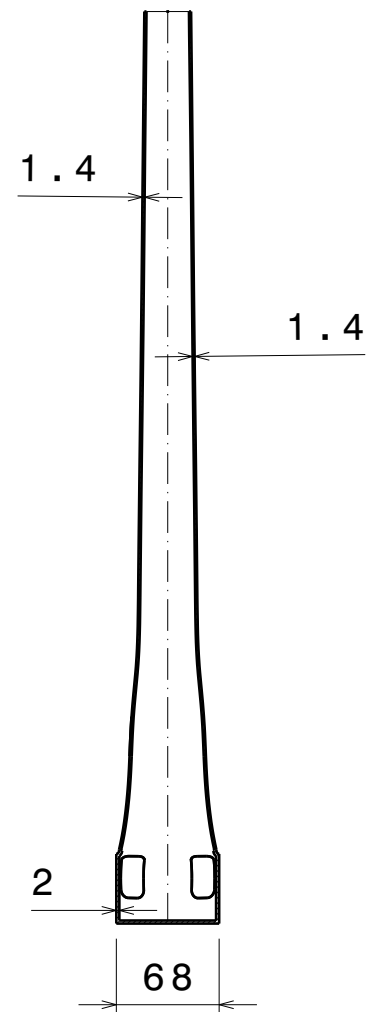
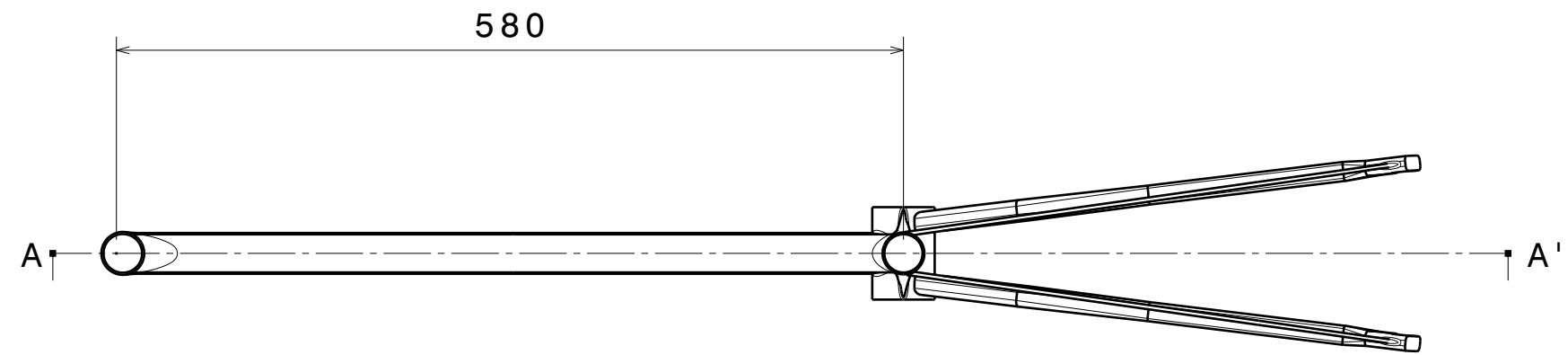


7	Caja del pedalier	Fibra de Carbono	2 mm	[0º/45º/-45º/0º]
6	Vaina superior	Fibra de Carbono	0.8 mm	[0º/45º/-45º/0º]
5	Vaina inferior	Fibra de Carbono	0.8 mm	[0º/45º/-45º/0º]
4	Tubo oblicuo	Fibra de Carbono	1.2 mm	[0º/45º/-45º/0º]
3	Tubo del sillín	Fibra de Carbono	1.4 mm	[0º/45º/-45º/0º]
2	Tubo horizontal	Fibra de Carbono	1.2 mm	[0º/45º/-45º/0º]
1	Tubo de dirección	Fibra de Carbono	1.6 mm	[0º/45º/-45º/0º]
Nº Pieza	Nombre	Material	Espesor	Láminas

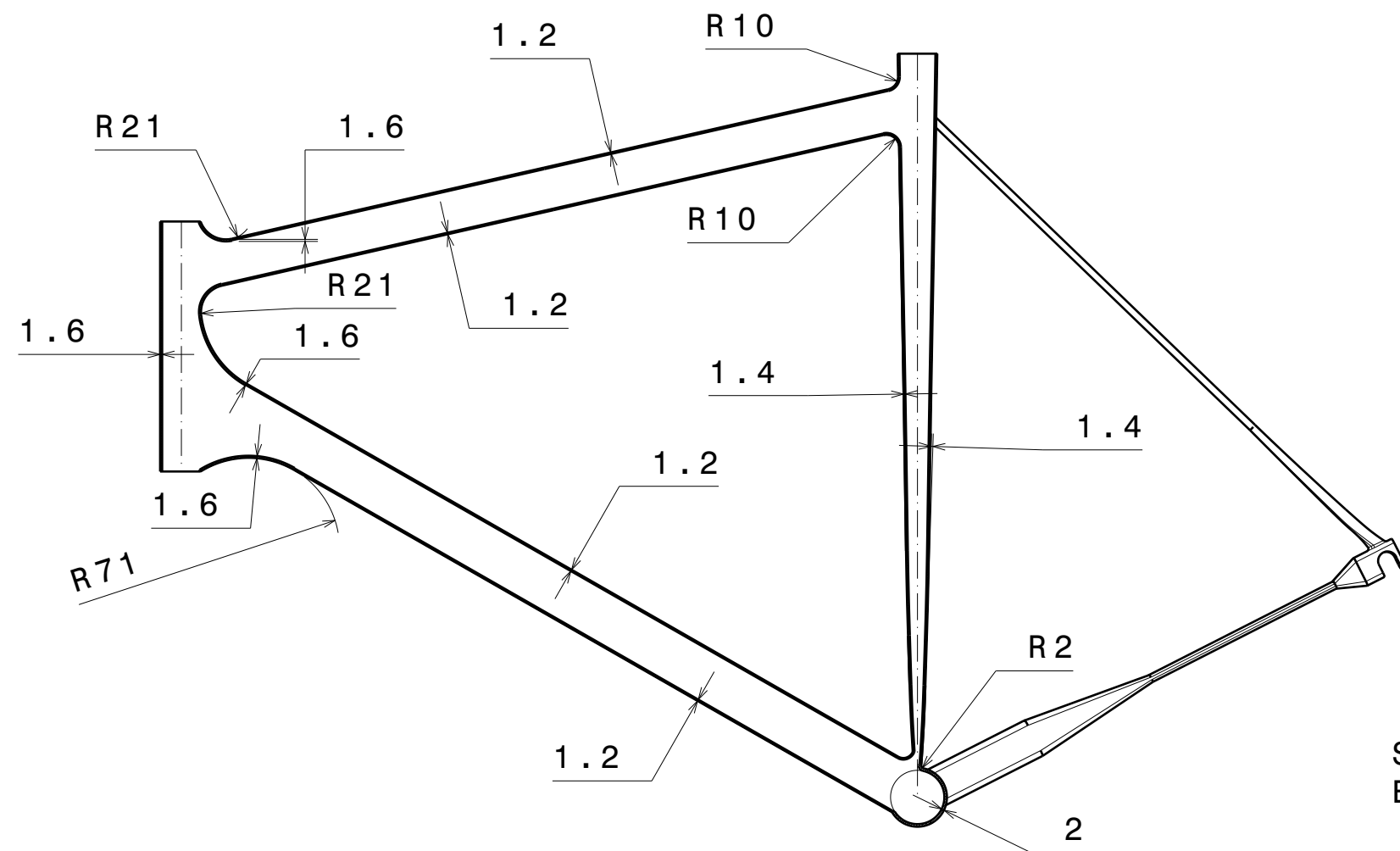
up ^{na}	UNIVERSIDAD PÚBLICA DE NAVARRA NAFARROAKO UNIBERSITATE PUBLIKOA		E.T.S.I.I.T DEPARTAMENTO DE ING.MECÁNICA, ENERGÉTICA Y DE MATERIALES		
	PROYECTO: CUADRO DE BICICLETA EN MATERIAL COMPUESTO		INGENIERO TÉCNICO INDUSTRIAL M.		
	PLANO: VISTA ISOMÉTRICA		FECHA: 17/2/2014	ESCALA: 7:20	Nº PLANO 1
		REALIZADO: ALBERTO FCO SOLANA RODRÍGUEZ			



<div>up^{na}</div>	UNIVERSIDAD PÚBLICA DE NAVARRA NAFARROAKO UNIBERSITATE PUBLIKOA	E.T.S.I.I.T DEPARTAMENTO DE ING.MECÁNICA, ENERGÉTICA Y DE MATERIALES INGENIERO TÉCNICO INDUSTRIAL M.		
	PROYECTO: CUADRO DE BICICLETA EN MATERIAL COMPUESTO	REALIZADO: ALBERTO FCO SOLANA RODRÍGUEZ		
PLANO:	ALZADO COTAS	FECHA: 17/2/2014	ESCALA: 7:20	Nº PLANO 2

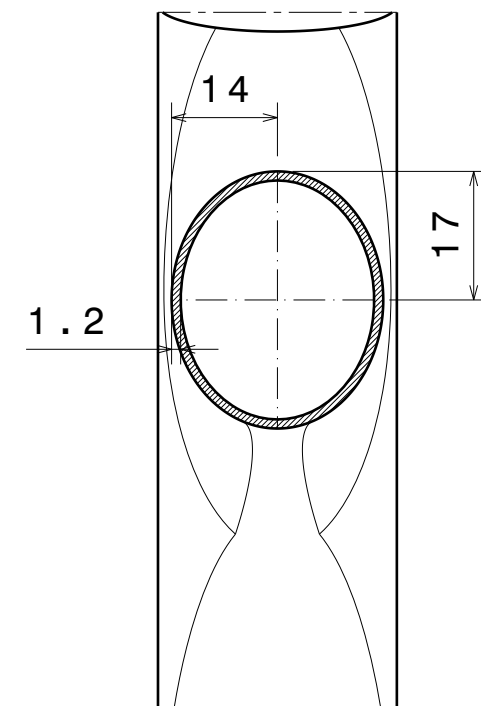
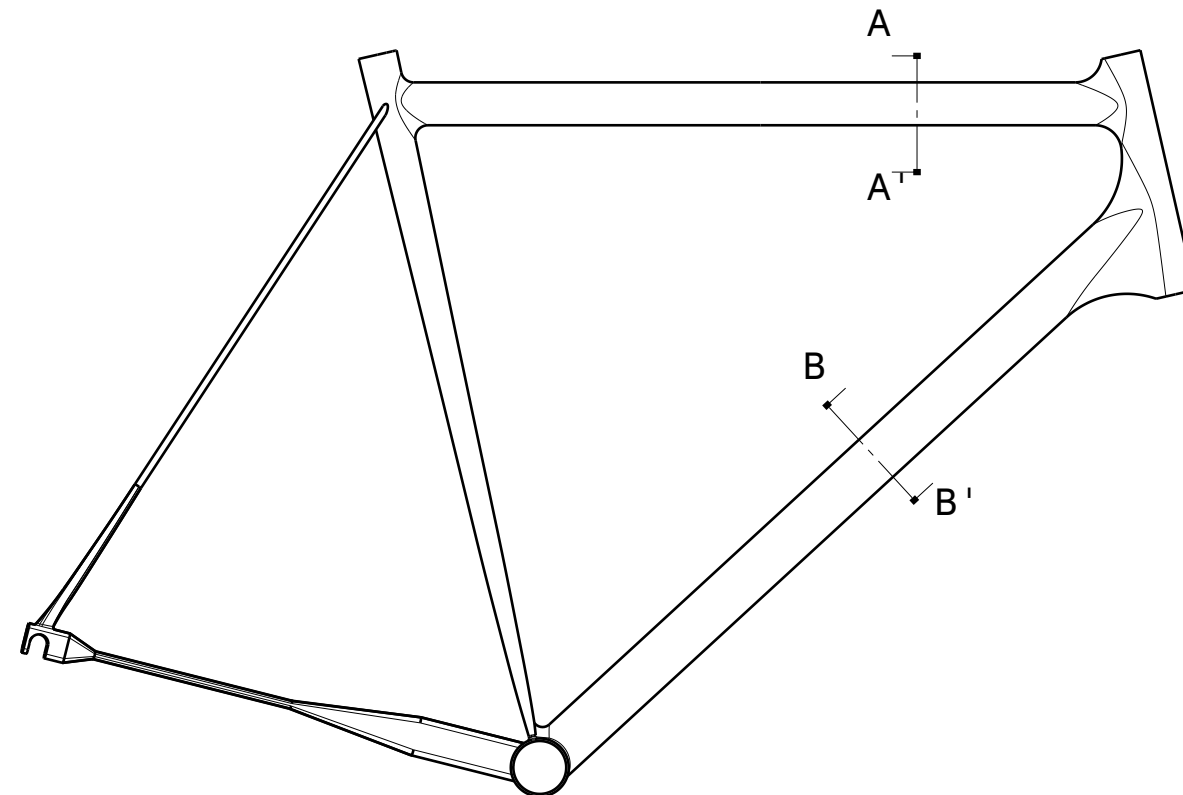


Sección B-B'
Escala: 1:5

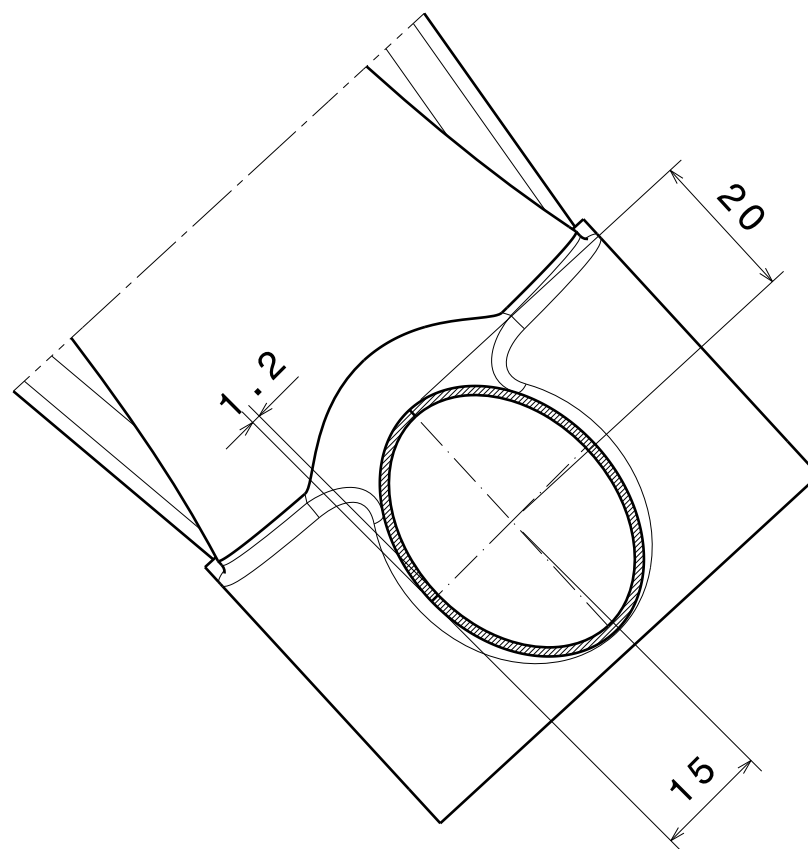


Sección A-A'
Escala: 1:5

up^{na} UNIVERSIDAD PÚBLICA DE NAVARRA NAFARROAKO UNIBERSITATE PUBLIKOA	E.T.S.I.I.T DEPARTAMENTO DE ING.MECÁNICA, ENERGÉTICA Y DE MATERIALES INGENIERO TÉCNICO INDUSTRIAL M.		
	REALIZADO: ALBERTO FCO SOLANA RODRÍGUEZ		
PROYECTO: CUADRO DE BICICLETA EN MATERIAL COMPUESTO	FECHA: 17/2/2014	ESCALA: 1:5	Nº PLANO 3
PLANO: PLANTA			

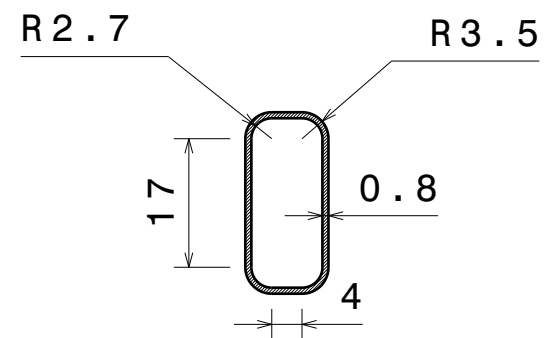
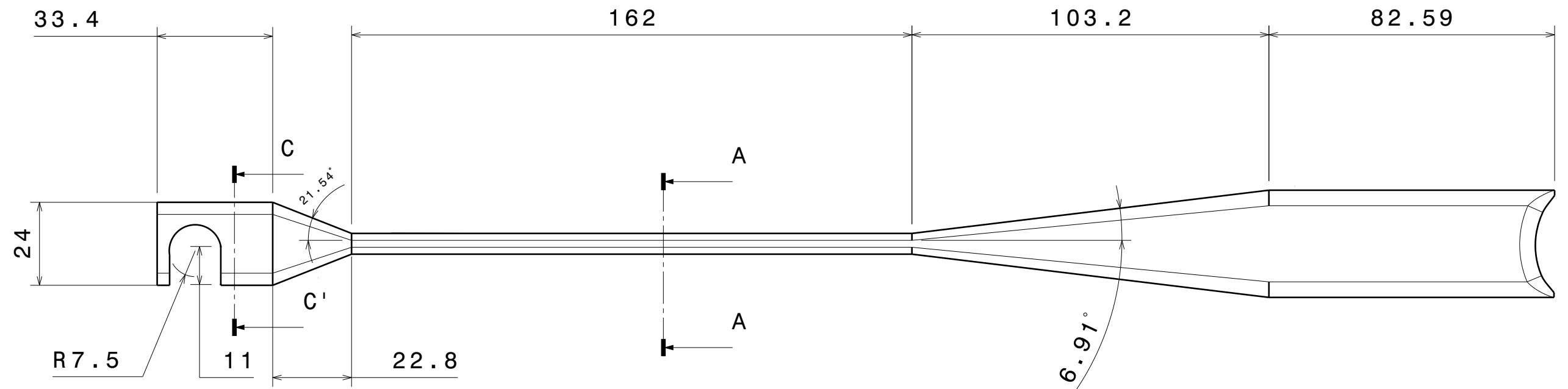


Sección A-A'
Escala: 1:1

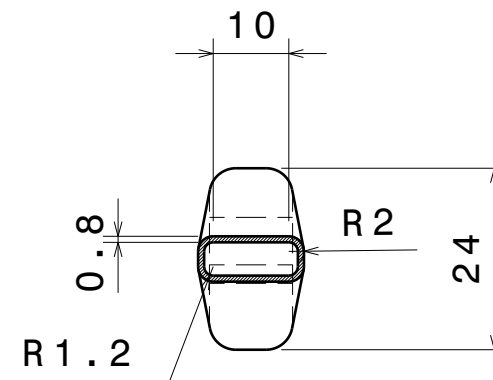


Sección B-B'
Escala: 1:1

up^{na} UNIVERSIDAD PÚBLICA DE NAVARRA NAFARROAKO UNIBERSITATE PUBLIKOA	E.T.S.I.I.T DEPARTAMENTO DE ING.MECÁNICA, ENERGÉTICA Y DE MATERIALES INGENIERO TÉCNICO INDUSTRIAL M.		
	REALIZADO: ALBERTO FCO SOLANA RODRÍGUEZ		
PROYECTO: CUADRO DE BICICLETA EN MATERIAL COMPUERTO	FECHA: 17/2/2014	ESCALA: 1:3	Nº PLANO 4
PLANO: ALZADO SECCIONES TUBOS			

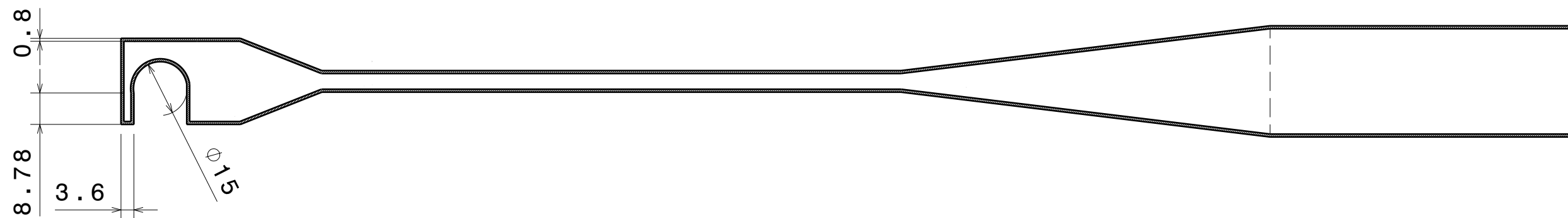
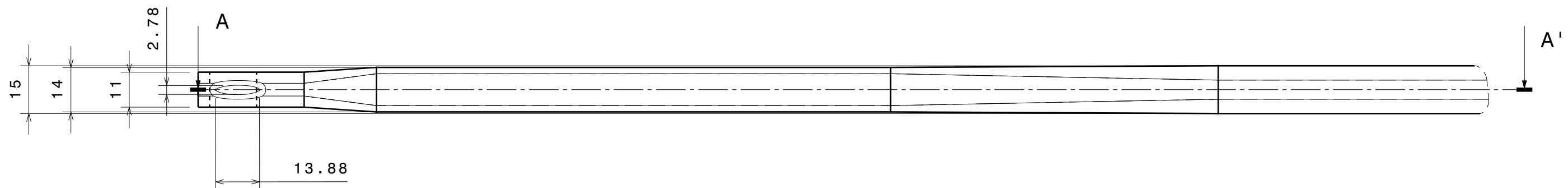


Sección C-C'
Escala: 1:1



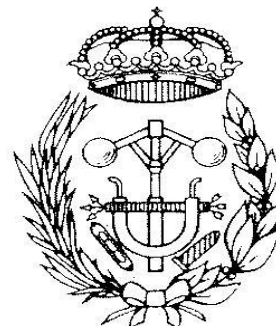
Sección A-A'
Escala: 1:1

up^{na} UNIVERSIDAD PÚBLICA DE NAVARRA NAFARROAKO UNIBERSITATE PUBLIKOA	E.T.S.I.I.T DEPARTAMENTO DE ING.MECÁNICA, ENERGÉTICA Y DE MATERIALES INGENIERO TÉCNICO INDUSTRIAL M.		
	REALIZADO: ALBERTO FCO SOLANA RODRÍGUEZ		
PROYECTO: CUADRO DE BICICLETA EN MATERIAL COMPUESTO	FECHA: 17/2/2014	ESCALA: 1:2	Nº PLANO 5
PLANO: VAINA INFERIOR ALZADO			



Sección A-A'
Escala: 3:4

up^{na}	UNIVERSIDAD PÚBLICA DE NAVARRA NAFARROAKO UNIBERSITATE PUBLIKOA		E.T.S.I.I.T DEPARTAMENTO DE ING.MECÁNICA, ENERGÉTICA Y DE MATERIALES INGENIERO TÉCNICO INDUSTRIAL M.	
	PROYECTO: CUADRO DE BICICLETA EN MATERIAL COMPUESTO		REALIZADO: ALBERTO FCO SOLANA RODRÍGUEZ	
PLANO: VAINA INFERIOR PLANTA		FECHA: 17/2/2014	ESCALA: 3:4	Nº PLANO 6



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación :

INGENIERO TÉCNICO INDUSTRIAL MECÁNICO

Título del proyecto:

CUADRO DE BICICLETA EN MATERIAL COMPUESTO

DOCUMENTO N°4 PLIEGO DE CONDICIONES

Alberto Solana Rodríguez

Vanessa Estremera Carrera

Pamplona, 17 de Febrero de 2014

INDICE

PLIEGO DE CONDICIONES

4.1 INTRODUCCIÓN.....	3
4.2 OBJETO	3
4.3 CONDICIONES GENERALES	3
4.4 ACCESORIOS	4
4.5 SEGURIDAD.....	5
4.6 MANTENIMIENTO.....	5
4.6.1 Mantenimiento de la cadena	5
4.6.2 Mantenimiento de platos y piñones	5
4.6.3 Mantenimiento de el cuadro.....	6
4.6.4 Mantenimiento de los frenos.....	6
4.6.5 Mantenimiento de los neumáticos	6

4.1 INTRODUCCIÓN

La elaboración del pliego de condiciones ha sido algo novedosa para mi debido a la costumbre de trabajar con pliegos enfocados al mundo de la construcción. Debido a que tampoco es una máquina y que no está hecha para un concurso público, en este pliego se van a establecer algunas condiciones de uso, calidades de materiales, mantenimiento de los accionamientos mecánicos y recambios.

4.2 OBJETO

1. Establecer las condiciones técnicas mínimas de uso así como servir de guía de instalación para el fabricante.
2. Garantizar el cumplimiento de las normas para la fabricación del cuadro y para los materiales usados durante el proceso.
3. Asegurar una calidad final consecuente con el uso para el que está concebido el cuadro.

4.3 CONDICIONES GENERALES

- Los materiales empleados en la fabricación serán de primera calidad y cumplirán la norma UNE-EN-2561 que garantiza la realización de ensayos de resistencia previos.
- En caso de uso de preimpregnados, se deberán almacenar correctamente. Los preimpregnados de carbono-epoxi suelen tener una vida en toro a los 365 días si se conservan en cámara frigorífica a -18 °C, y de 240 horas fuera de dicha cámara, de forma continua o en intervalos acumulativos.
- El proceso de curado no deberá superar en ningún momento los 300 °C para conservar la rigidez de la resina epoxi.
- Cualquier cambio en el proceso de fabricación corre a cargo del fabricante y ha de cumplir siempre los puntos anteriores.

4.4 ACCESORIOS

En el siguiente apartado se describe la lista detallada de accesorios que se le deben incluir al cuadro para que pueda circular de forma segura y cumpliendo la normativa de seguridad vial.

- Acabado: El color y diseño final será elegido por el comprador. Se deberá adjuntar una descripción del acabado del cuadro, indicando en especial si se prevén procesos de acabado resistentes a la intemperie y a los procesos de limpieza que permitan alargar la vida útil de las bicicletas.
- Manillar: Conjunto potencia y manillar con opción a elegir manillar de triatlón si el comprador así lo desea.
- Iluminación: Dotación de reflectantes y sistema de iluminación compuesto de piloto trasero y reflectantes.
- Pedales: Antideslizantes con reflectantes o específicos para encajar calas.
- Frenos: Sistema de frenos en rueda delantera y trasera. A escoger entre frenos de disco o zapatas según el gusto del comprador.
- Identificación: El cuadro deberá llevar inscrito su número de serie así como las iniciales del dueño y los últimos 5 dígitos del NIF.
- Ruedas: Las bicicletas dispondrán de ruedas resistentes a la perforación, y válidas para circular por carretera o pista.
- Homologación: Deberán ser homologadas por la UE.
- Sillín: Regulable.
- Guardabarros: Opcional.
- Potenciómetro y cuentakilómetros.
- Kit de mantenimiento: Troncha-cadenas, llaves allen e inflador de ruedas con la válvula adecuada.

4.5 SEGURIDAD

El cuadro ha de cumplir la normativa UNE-EN-14781 para Bicicletas de carreras, requisitos de seguridad y métodos de ensayo.

4.6 MANTENIMIENTO

Es necesario seguir unas pautas básicas a la hora de realizar el mantenimiento sobre determinadas partes. Estas labores permiten también conocer el estado de uso de las piezas para determinar cuándo es necesaria una reparación o sustitución.

4.6.1 MANTENIMIENTO DE LA CADENA

- La cadena ha de estar siempre bien lubricada. Para el uso que se le va a dar, el tipo de lubricante ha de cumplir la norma DIN 51524-Parte 2 HLP para lubricación de cojinetes, hidráulicos, guías y engranajes.
- La cadena está concebida para trabajar una vida útil media de 5.000 kilómetros
- Este mecanismo cumple la norma DIN 8187 y cuando la vida útil esté terminada, sólo podrá reemplazarse por otra que también la cumpla.

4.6.2 MANTENIMIENTO DE PLATOS Y PIÑONES

Esta bicicleta monta de serie un conjunto Platos Shimano Dura Ace FC-9000 50-34T y Casette Shimano Dura Ace CS-7700 9 speed 11-23T.

- En caso de cambio de desarrollos, han de ser preferiblemente de la misma gama. De lo contrario se ha de consultar al fabricante por las diversas opciones compatibles.
- El lubricante utilizado para la lubricación de este sistema ha de cumplir la norma DIN 51524-Parte 2 HLP para lubricación de cojinetes, hidráulicos, guías y engranajes.
- De forma frecuente es aconsejable realizar una revisión visual del estado de los engranajes y proceder a su cambio si están desgastados. Los platos tienen una vida media de 16.000 Km y el cassette de piñones 8.000 Km.

4.6.3 MANTENIMIENTO DE EL CUADRO

- El cuadro se deberá rociar con una pintura anticorrosiva después de su fabricación. En caso de caída o golpe que implique fractura o astillamiento del cuadro, deberá llevarse a reparar a distribuidores autorizados.
- Será decisión del fabricante dónde instalar los cables de los accionamientos mecánicos.

4.6.4 MANTENIMIENTO DE LOS FRENOS

- El llenado de los depósitos de líquido en caso de que sean hidráulicos, se deberá realizar con fluido que cumpla la norma UNE 26 109 88 para líquido de frenos.

4.6.5 MANTENIMIENTO DE LOS NEUMÁTICOS

- Los neumáticos han de ir siempre inflados con las presiones que dicte el fabricante.
- En caso de sustitución, los nuevos han de cumplir la norma UNE 69043 para neumáticos de bicicletas y recomendaciones de seguridad.

Pamplona, a 17 de febrero de 2014

Alberto Solana Rodríguez

Ingeniero Técnico Industrial Mecánico



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación :

INGENIERO TÉCNICO INDUSTRIAL MECÁNICO

Título del proyecto:

CUADRO DE BICICLETA EN MATERIAL COMPUESTO

DOCUMENTO N°5 PRESUPUESTO

Alberto Solana Rodríguez

Vanesa Estremera Carrera

Pamplona, 17 de febrero de 2014

ÍNDICE

PRESUPUESTO

CAPITULO 1 MATERIALES.....	3
CAPITULO 2 ACCESORIOS	3
CAPITULO 3 ENSAYOS MECÁNICOS.....	4
RESUMEN DEL PRESUPUESTO	4

PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL**PRESUPUESTO PARCIAL Nº 1 MATERIALES**

Nº	UD	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO	TOTAL
1.2	Ud	Resina Epoxy EC 131 LV 20 Kg	1	398,33	398,33
1.1	m ²	Fibra de carbono 3K 200g/m ²	3	43,56	130,68
TOTAL PRESUPUESTO PARCIAL Nº 1 MATERIALES:					529,01

PRESUPUESTO PARCIAL Nº 2 ACCESORIOS

Nº	UD	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO	TOTAL
2.1	Ud	Bielas Shimano Dura-Ace 7950 177 A1mm 50 34 9V	1	422,30	422,30
2.2	Ud	Juego cazoletas pedalier Shimano Dura-Ace SMBB9000 ITA Mini	1	27,9	27,9
2.3	Ud	Pedales Shimano Dura-Ace PD-7900 SPD-SL para carretera	1	203,9	203,9
2.4	Ud	Cadena Shimano XT 9 velocidades 114 eslabones MTB	1	18,75	18,75
2.5	Ud	Rueda delantera Shimano Dura-Ace 9000 C75 Carbono Tubular	1	1126,5	1126,5
2.6	Ud	Rueda trasera Shimano Dura-Ace 9000 11v. C50 Carbono Aluminio Cubierta	1	1529,25	1529,25
2.7	Ud	Cassette Shimano Dura-Ace 11-23 10 velocidades carretera	1	168,3	168,3
2.8	Ud	Cambio Shimano Ultegra DI2 RD6870	1	157	157
2.9	Ud	Desviador Shimano Ultegra DI2 FD6870 11x2v	1	154,2	154,2
2.10	Ud	Sillín Selle Italia Max Flite Gel Flow blanco	1	76,42	76,42
2.11	Ud	Juego puentes Shimano Dura-Ace BR9000 tuercas surtidas	1	219,9	219,9
2.12	Ud	Potencia Pro PLT Carbon + -10 grados 31,8 mm. 120 mm.	1	89	89
2.13	Ud	Manillar Easton EC70 SL3 Carbono 420 31.6 mm.	1	149	149
2.14	Ud	Tija de sillín Crankbrothers Cobalt 3 400 30,8 mm. hierro negro	1	107	107

2.15	Ud	SRM Potenciómetro Shimano	1	2700	2700
TOTAL PRESUPUESTO PARCIAL Nº 2 ACCESORIOS:					7.149,42

PRESUPUESTO PARCIAL Nº 3 ENSAYOS MECÁNICOS

Nº	UD	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO	TOTAL
3.1	Ud	Ensayos de resistencia del material	1	800,00	800,00
TOTAL PRESUPUESTO PARCIAL Nº 3 ENSAYOS					800,00

PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL

PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL

Nº	CAPÍTULO	IMPORTE (€)
1	MATERIALES	529,01
2	ACCESORIOS	7.149,42
3	ENSAYOS MECÁNICOS	800,00
Presupuesto de ejecución material		8.478,43
13,00% Gastos generales		1.102,20
6,00% Beneficio industrial		508,71
SUMA DE G.G. y B.I.		1.610,90
21,00% I.V.A.		1.780,47
TOTAL PRESUPUESTO GENERAL		11.869,80

Asciende el Presupuesto de ejecución material a la expresada cantidad de ONCE MIL OCHOCIENTOS SESENTA Y NUEVE EUROS Y OCHENTA CÉNTIMOS

Pamplona, a 17 de Febrero de 2014
Alberto Solana Rodríguez
Ingeniero Técnico Industrial Mecánico